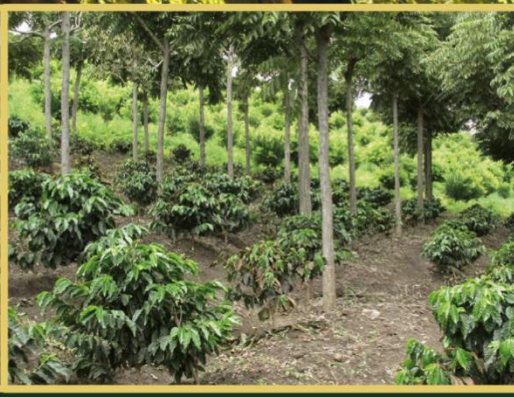


EL NOGAL ANDINO

Juglans neotropica Diels en Ecuador:

Bases científicas para la conservación, el manejo forestal y la bioeconomía sostenible de los paisajes andinos

MARIO AÑAZCO • HUGO VALLEJOS • GUILLERMO VARELA • OSCAR ERASO

ISBN: 978-9907-839-09-8

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
IBARRA - ECUADOR

GICFOR
Grupo de Investigación
Ciencias Forestales

Programa de Investigación
Juglans
Carrera de Ingeniería Forestal - UTN - 2021-2026

EDITORIAL UTN
IBARRA - ECUADOR

EDITORIAL Académica CIDE

EL NOGAL ANDINO

Juglans neotropica Diels en Ecuador:

Bases científicas para la conservación, el manejo forestal y la bioeconomía sostenible de los paisajes andinos

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
IBARRA - ECUADOR

GICFOR
Grupo de Investigación
Ciencias Forestales

Programa de Investigación
Juglans

EDITORIAL UTN
IBARRA - ECUADOR

EDITORIAL Académica CIDE

EL NOGAL ANDINO

Juglans neotropica Diels en Ecuador:

Bases científicas para la conservación, el manejo forestal y la bioeconomía sostenible de los paisajes andinos

Autores

Mario José Añazco Romero
Docente Titular Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales
mjanazco@utn.edu.ec

Hugo Vinicio Vallejos Álvarez
Docente Titular Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales
hvvallejos@utn.edu.ec

Guillermo David Varela Jácome
Docente Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales
gdvarelaj@utn.edu.ec

Oscar Hernando Eraso Terán
Docente Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales
oheraso@utn.edu.ec

El Nogal Andino *Juglans neotropica* Diels en Ecuador: Bases científicas para la conservación, el manejo forestal y la bioeconomía sostenible de los paisajes andinos

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquiera otro, sin la autorización previa por escrito al Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE).

Copyright © 2026
Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador
Tel.: + (593) 04 2037524
http.:/www.cidecuador.org

ISBN: 978-9907-839-09-8
https://doi.org/10.33996/cide.ecuador.9907839098

Créditos fotográficos. Salvo indicación expresa en las figuras y aperturas de capítulo, todas las fotografías incluidas en esta obra son de Mario Añazco. Las fotografías pertenecientes a otros autores se acreditan individualmente en las notas o leyendas correspondientes.

Declaración de la IA y aplicaciones asistidas. Se utilizó como apoyo en la optimización y edición de algunas figuras y en determinados párrafos del proceso de escritura.

Dirección editorial: Lic. Pedro Misacc Naranjo, Msc.
Coordinación técnica: Lic. María J. Delgado
Diseño gráfico: Lic. José Fuentes
Diagramación: Lic. Alba Gil
Fecha de publicación: 14 de octubre 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
IBARRA - ECUADOR

GICFOR
Grupo de Investigación
Ciencias Forestales

Programa de Investigación
Juglans

EDITORIAL UTN
IBARRA - ECUADOR

EDITORIAL Académica CIDE

Guayaquil - Ecuador

Catalogación en la Fuente

La presente obra fue evaluada por pares académicos experimentados en el área.

Cómo citar:

Añazco Romero, M. J., Vallejos Alvárez, H. V., Varela Jácome, G. D., & Eraso Terán, O. H. (2026). El nogal andino *Juglans neotropica* Diels en Ecuador: Bases científicas para la conservación, el manejo forestal y la bioeconomía sostenible de los paisajes andinos. Editorial CIDE; Editorial UTN.

623 p.: incluye tablas, figuras; 21 x 29,7 cm.

ISBN: 978-9907-839-09-8

1. *Juglans neotropica*
2. Conservación
3. Manejo Forestal
4. Bioeconomía sostenible
5. Paisajes Andinos

Revisión de Pares
Héctor Flores Zúñiga, Ingeniero Agrónomo MBA de la Universidad de Santiago de Chile.

Iván Andrés Delgado Vargas, Ingeniero Agroforestal, Magíster en Agroforestería Tropical y candidato a doctor en Ciencias Agrarias de la Universidad de Nariño, Colombia.

Corrección de estilo
Gelis Torrealba Núñez

Contenido

Prólogo 25
Foreword 29
Kallari rimay 31
Presentación 33
Agradecimiento 35

Capítulo 1
Introducción

Introducción 38

Capítulo 2
Estado del arte y construcción del conocimiento sobre *Juglans neotropica*

2.1. Metodología del análisis bibliográfico 46
2.2. Evolución temporal de la producción bibliográfica 48
2.3. Génesis de la investigación sobre *J. neotropica* en Ecuador: de la práctica forestal a la investigación científica 50
2.4. Estructura y especialización del corpus bibliográfico 54
2.5. Producción académica y contribución de las universidades 56
2.5.1. De los trabajos de titulación a la publicación científica 58
2.5.2. Consolidación de líneas de investigación y formación especializada 58
2.6. Tendencias temáticas y grado de desarrollo del conocimiento 59
2.7. Vacíos de conocimiento y prioridades de investigación 61

Capítulo 3
Historia ambiental y patrimonio biocultural de *Juglans neotropica* en Ecuador

3.1. Historia ambiental de *J. neotropica* en Ecuador 67
3.1.1. Primeros registros históricos del nogal andino 67
3.1.2. Usos tradicionales documentados 68
3.1.3. Valor ecológico e historia de la conservación 68
3.2. *J. neotropica* como patrimonio biocultural del Ecuador 69
3.2.1. Árbol integrador del territorio 69
3.2.2. Árbol patrimonial del Ecuador 70
3.2.3. Longevidad y conservación de los bosques naturales de *J. neotropica* 71
3.2.4. La Chakra Andina como SIPAM 71

3.3. Identidad territorial y patrimonio cultural asociado al nogal …… 72
3.3.1. La tradición artesanal de San Antonio de Ibarra ……..…….. 72
3.3.2. Patrimonio gastronómico ……. 74
3.3.3. El nogal como fuente de tintes tradicionales …… 75
3.3.4. La Ruta del Nogal como estrategia de valorización del patrimonio biocultural . 77
3.4. Sociedad, conocimiento tradicional y etnociencias asociadas a *J. neotropica* ……. 78
3.4.1. Percepciones sociales sobre el nogal andino ……..……..……. 78
3.4.2. Diferencias socioculturales en la valoración de la especie …..……..… 79
3.4.3. Etnociencias asociadas al nogal ……..……..…… 79
3.4.4. Conservación del conocimiento tradicional ……. 80
3.4.5. Memoria oral y transmisión intergeneracional del conocimiento: el nogal en Natabuela ……..……..……. 81
3.5. Perspectivas para la conservación del patrimonio biocultural de *J. neotropica* …….. 82

Capítulo 4
Botánica, filogenia y evolución de *Juglans neotropica*

4.1. Botánica ……..…….……..…….……. 86
4.1.1. Etimología del género *Juglans*……..……...…….……. 86
4.1.2. Taxonomía de *J. neotropica* ……..…… 87
4.1.3. Sinonimia y consideraciones taxonómicas ……..……..…… 87
4.1.4. El género *Juglans* y las principales especies ……..……..……..…… 88
4.1.5. Nombres comunes ……..……...……..…… 89
4.1.6. Morfología de *J. neotropica* ……. 89
4.2. Filogenia, evidencia genómica y evolución de *J. neotropica* ……..……..…… 101
4.2.1. Posición filogenética dentro de Juglandaceae ……..……...……...…… 101
4.2.2. Evidencia filogenómica reciente ……...……..…….. 102
4.2.3. Origen y diversificación andina ……..……..……..….. 103
4.2.4. Estado del conocimiento genético de *J. neotropica* en Ecuador …..…… 105
4.2.5. Implicaciones evolutivas y conservación genética de *J. neotropica* …… 107

Capítulo 5
Distribución geográfica y ecología de *Juglans neotropica* frente al cambio climático

5.1. Distribución geográfica de *J. neotropica* en Ecuador ……..……..… 111
5.2. Nicho ecológico ……..…….. 114
5.2.1. Gradiente altitudinal ……..…….. 114
5.2.2. Gradiente térmico ……..……. 116
5.2.3. Régimen de precipitación ……..……. 117
5.2.4. Interacción entre variables bioclimáticas …… 118
5.3. Factores ecológicos ……..…….. 121
5.3.1. Suelos ……...……..…….. 121
5.3.2. Condiciones edafoclimáticas y desarrollo dasométrico: estudio de caso en Yuyucocha ……..…… 122
5.3.3. Ecosistemas ……..…… 126
5.4. Estado de conservación ……..……..….. 130
5.5. Modelación de la distribución potencial en Imbabura ……...…… 131

5.6. Cambio climático, vulnerabilidad e implicaciones para la conservación, restauración y manejo de *J. neotropica* en Ecuador 132
5.6.1. Evidencias de cambios climáticos en poblaciones de *J. neotropica* 133
5.6.2. Escenarios climáticos futuros 133
5.6.3. Cambios potenciales en la idoneidad climática de *J. neotropica* en Ecuador .. 134
5.6.4. Orientaciones para el manejo adaptativo 137
5.7. Implicaciones para la conservación y restauración 137
5.7.1. *J. neotropica* como especie de integración biogeográfica 138
5.7.2. Conectividad ecológica y restauración del paisaje 138
5.7.3. Manejo de microcuencas y restauración ecológica 139
5.8. Función ecológica de *J. neotropica* en los paisajes andinos 140

Capítulo 6
Fenología de *Juglans neotropica*

6.1. Fenología de *J. neotropica* en Ecuador 144
6.2. Dinámica fenológica en la provincia de Imbabura 146
6.2.1. Calendario fenológico comparativo..... 148
6.2.2. Interpretación ecofisiológica del calendario fenológico 151
6.2.3. Implicaciones ecológicas y silviculturales de la variación fenológica entre sistemas de trabajo 154
6.3. Síntesis e implicaciones para la investigación y el manejo 157

Capítulo 7
Calidad de las semillas de *Juglans neotropica*

7.1. Fundamentos para obtener semillas de calidad con fines de reproducción 171
7.2. Calidad genética 163
7.2.1. Calidad genética de las semillas de *J. neotropica* 163
7.2.2. Influencia de la procedencia geográfica sobre la calidad genética de las semillas 164
7.2.2.1. Latitud y su influencia sobre la calidad genética de las semillas 164
7.2.2.2. Altitud sobre el nivel del mar y su influencia sobre la calidad genética de las semillas 165
7.2.2.3. Integración de los efectos de la procedencia 166
7.2.3. Influencia de la fuente semillera sobre la calidad de las semillas 166
7.2.3.1. Clasificación de las fuentes semilleras en el Ecuador 166
7.2.3.2. Influencia de la fuente semillera sobre la germinación 167
7.2.3.3. Integración del efecto de la fuente semillera 168
7.2.4. Selección fenotípica de árboles semilleros 168
7.2.4.1. Características fenotípicas de los árboles semilleros 168
7.2.4.2. Variación fenotípica y desempeño reproductivo 169
7.2.4.3. Integración de la selección fenotípica 171
7.2.5. Gestión participativa de fuentes semilleras 171
7.2.6. Integración de la calidad genética de las semillas 173
7.3. Calidad física de las semillas de *J. neotropica* en Ecuador 174
7.3.1. Pureza de las semillas 174
7.3.2. Contenido de humedad 175
7.3.3. Número de semillas por kilogramo 175

7.3.4. Tamaño de las semillas ……..…….…...…….. 176
7.3.5. Influencia del tamaño de la semilla sobre la germinación ……..……. 179
7.3.6. Influencia del tamaño de la semilla sobre el crecimiento inicial de las plántulas 180
7.4. Calidad fisiológica de las semillas de *J. neotropica* ……. 182
7.4.1. Viabilidad de las semillas ……..……...…… 183
7.4.1.1. Evaluación mediante la prueba de tetrazolio ……..……..…….. 184
7.4.1.2. Evaluación mediante el método de flotación ……. 186
7.4.2. Porcentaje de germinación (PG) …...……..……. 187
7.4.3. Índices fisiológicos de germinación y vigor ……. 190
7.4.4. Relación tallo:raíz en biomasa y longitud de plántulas de *J. neotropica* …..….. 192
7.4.5. Técnicas avanzadas para la evaluación de la calidad fisiológica de las semillas. 193
7.5. Calidad sanitaria de frutos y semillas de *J. neotropica* ……. 195
7.5.1. Concepto e importancia de la calidad sanitaria ……..……...…… 195
7.5.2. Principales agentes de deterioro sanitario …..……... 196
7.5.2.1. Insectos asociados al deterioro de frutos y semillas ……..… 196
7.5.2.2. Microorganismos asociados al deterioro sanitario …….. 197
7.5.3. Factores predisponentes al deterioro sanitario ……..…… 197
7.5.4. Evaluación de la calidad sanitaria ..……...…… 198
7.5.5. Interpretación de los estados sanitarios observados en frutos y semillas …… 200

Capítulo 8
Propagación y producción de plantas de *Juglans neotropica*

8.1. Propagación sexual ……..…….……...…….…… 207
8.1.1. Fundamentos biológicos y operativos de la propagación sexual …….. 207
8.1.1.1. Indicadores de madurez fisiológica y extracción de la pulpa de los frutos 208
8.1.1.2. Semillas recalcitrantes …...…… 208
8.1.1.3. Almacenamiento ……..……. 209
8.1.1.4. Dormancia en *J. neotropica* …….……. 210
8.1.1.5. Discrepancia entre viabilidad y germinación ……. 210
8.1.1.6. Germinación asincrónica …….…….. 211
8.1.1.7. Tipo de germinación ……...… 212
8.1.1.8. Técnica de siembra de semilla ……..… 212
8.1.1.9. Contenedores para la producción de plántulas de *J. neotropica* en vivero. 213
8.1.1.10. Tratamiento pregerminativos ……..……..……. 215
8.1.1.10.1. Tratamientos químicos ……..……..… 216
8.1.1.10.2. Tratamientos físicos ……..…… 217
8.1.1.10.3. Tratamientos mecánicos ……..……..…. 218
8.1.1.10.4. Tratamientos fisiológicos ……..……..… 219
8.1.1.10.5. Tratamientos biológicos ……...…… 219
8.1.1.10.6.Comparación general e interpretación ecofisiológica de los tratamientos pregerminativos …… 219
8.1.1.10.7. Recomendaciones para la propagación en vivero …….. 221
8.1.2. Sustratos ……..…… 223
8.1.2.1. Análisis comparativo de la germinación en diferentes sustratos y regiones del Ecuador ...……...…… 224
8.1.2.2. Germinación según combinaciones de sustrato y tratamiento pregerminativo en *J. neotropica* …….……...…. 227
8.1.2.3. Recomendaciones técnicas para la selección de sustratos y tratamientos pregerminativos ……...…… 229

8.1.3. Análisis de variables morfológicas en la producción de plantas de *J. neotropica* 230
8.1.3.1. Crecimiento aéreo de las plántulas (altura del tallo) …….…….. 231
8.1.3.2. Desarrollo del sistema radicular ……..…….…… 231
8.1.3.3. Robustez estructural de las plántulas (diámetro basal) …..……..… 232
8.1.3.4. Integración e interpretación de las variables morfológicas …….……. 233
8.1.4. Germinación y calidad morfológica como criterios para la evaluación de plántulas de *J. neotropica* ……..……. 233
8.1.4.1. La germinación: condición necesaria, pero no suficiente ……. 234
8.1.4.2. Calidad morfológica como indicador funcional …… 234
8.1.4.3. Sobrevivencia como indicador integrador de calidad …… 235
8.1.4.4. Integración de los criterios de calidad de planta …….…….. 235
8.1.5. Prácticas culturales de vivero para la producción de plántulas de *J. neotropica* 236
8.1.5.1. Uso de cobertores y sombra …….……. 236
8.1.5.2. Manejo del riego ……..…….……. 237
8.1.5.3. Fertilización …….……...…… 238
8.1.5.4. Manejo fitosanitario ……..……..……. 240
8.1.5.5. Poda en vivero …….……...…..……. 242
8.1.5.6. Lignificación y endurecimiento …….……..…… 243
8.2. Propagación asexual de *J. neotropica* …….. 245
8.2.1. Fundamentos biológicos y aplicaciones de la propagación vegetativa …….. 246
8.2.2. Propagación vegetativa mediante enraizamiento de estacas …….……. 246
8.2.3. Injertación como estrategia de propagación clonal ……..…. 247
8.2.4. Comparación técnica e interpretación de los métodos de propagación vegetativa…….…… 249
8.3. Micropropagación y cultivo de tejidos de *J. neotropica* …….. 250
8.3.1. Fundamentos biológicos de la micropropagación ……..…….. 251
8.3.2. Desarrollo de la micropropagación de *J. neotropica* en Ecuador ……. 251
8.3.3. Avances regionales y perspectivas para la micropropagación …….……. 252

Capítulo 9
Plantaciones forestales de *Juglans neotropica*

9.1. Tipos de plantaciones forestales con *J. neotropica* ……. 256
9.1.1. Plantaciones con fines comerciales …….…….…….……. 257
9.1.2. Plantaciones estratégicas para la conservación y el mejoramiento genético … 258
9.1.3. Plantaciones para restauración ecológica ……... 260
9.1.4. Plantaciones de enriquecimiento en bosques secundarios …….…… 262
9.1.5. Plantaciones en el arbolado urbano y periurbano …….…… 264
9.2. Establecimiento de plantaciones de *J. neotropica* …….……... 266
9.2.1. Selección del sitio …….……. 266
9.2.2. Selección y calidad del material vegetal ……...…….…… 267
9.2.3. Preparación del sitio ……..…… 269
9.2.4. Diseño, trazado y señalamiento ……..… 270
9.2.5. Apertura y acondicionamiento de hoyos …… 270
9.2.6. Métodos de establecimiento …….. 272
9.2.6.1. Siembra directa …… 272
9.2.6.2. Plantación con material producido en vivero …….. 273
9.2.6.3. Uso y manejo de regeneración natural ……. 273
9.2.7. Ejecución de la plantación …….……. 275

9.3. Manejo silvicultural durante el establecimiento …… 276
9.3.1.Control de la vegetación competidora ……..……..…….. 277
9.3.2. Uso de herbicidas ……..……..…… 277
9.3.3. Manejo nutricional y fertilización ……..……..……...… 278
9.3.3.1. Evidencia experimental sobre fertilización en plantaciones de *J. neotropica* en Ecuador ……...…….. 279
9.3.3.2. Fertilización orgánica e inorgánica: respuestas complementarias …… 281
9.3.4. Manejo hídrico y riego suplementario ……..……..…… 282
9.3.4.1. Balance hídrico durante el establecimiento: estudio de caso en Yuyucocha ……..……..…… 282
9.4. Regeneración natural y manejo silvicultural de *J. neotropica* ……. 283
9.4.1. Dinámica y condiciones para la regeneración natural ……..…. 284
9.4.2. Estructura de la regeneración y flora asociada ……..…… 284
9.4.3. Interacciones con la fauna …… 285
9.4.4. Factores limitantes de la regeneración ……..……..……. 285
9.4.5. Implicaciones para el manejo y la regeneración asistida …..……..……. 286
9.5. *J. neotropica* en los instrumentos de política forestal y restauración del Ecuador ..… 288
9.5.1. Plan de forestación y reforestación de la provincia de Imbabura ……..…… 288
9.5.2. Plan Nacional de Restauración Ecológica con Enfoque de Paisaje 2025–2035 . 289
9.5.3. Estrategia Forestal Sostenible del Ecuador 2026–2050 …… 290
9.5.4. Norma de Semillas Forestales y calidad genética del material reproductivo ….. 291
9.5.5. Articulación de los instrumentos de política pública con la silvicultura de *J. neotropica* …… 292

Capítulo 10
Sistemas agroforestales con *Juglans neotropica*

10.1. La chacra andina como sistema agroforestal tradicional ……..…… 296
10.2. Integración de *J. neotropica* en sistemas agroforestales contemporáneos ……. 298
10.2.1. Sistema agrosilvícola con *J. neotropica* ……. 299
10.2.1.1. *J. neotropica* en linderos ……..……. 299
10.2.1.2. *J. neotropica* en cercas mixtas …… 303
10.2.1.3. Cortina rompevientos multiespecífica de cuatro hileras en Yuyucocha, Imbabura ……..…… 303
10.2.1.4. *J. neotropica* asociada con café ……... 306
10.2.1.5. Asociación de nogal con cultivos anuales: el caso del maíz ……..……. 312
10.2.1.6. Arreglo multiestrato con dominancia arbórea de *J. neotropica* y cultivosiagrícolas de ciclo diferenciado ……..…… 314
10.2.1.7. Plantaciones lineales multipropósito ……..…….. 317
10.2.2. Sistemas silvopastoriles con *J. neotropica* ……..…….. 318
10.2.3. Sistemas agroforestales multiestrato: estudio de caso en Yuyucocha …… 323
10.2.4. Huertos tradicionales urbanos: caso de Cuenca ……. 329
10.2.5. Bosquetes de *J. neotropica* en áreas de producción agropecuaria ……. 332
10.3. Interacciones ecológicas y funcionales en sistemas agroforestales con *J. neotropica* …… 333

Capítulo 11
Productos y servicios ecosistémicos de *Juglans neotropica*

11.1. Productos madereros ……. 340
11.1.1. Propiedades organolépticas ……. 340
11.1.2. Propiedades anatómicas ……. 341
11.1.3. Propiedades físicas ……. 345
11.1.4. Propiedades químicas ……. 349
11.1.5. Propiedades mecánicas ……. 350
11.1.6. Propiedades de trabajabilidad ……. 352
11.1.7. Durabilidad natural ……. 355
11.1.8. Usos de la madera ……. 357
11.2. Productos forestales no madereros (PFNM) ……. 358
11.2.1. Tintes naturales ……. 358
11.2.2. Aceites ……. 361
11.2.3. Extractos ……. 363
11.2.4. Gel ……. 364
11.2.5. Gastronomía y productos alimenticios ……. 365
11.2.6. Potencial nutracéutico ……. 367
11.2.7. Usos medicinales ……. 369
11.2.7.1. Actividad antifúngica ……. 369
11.2.7.2. Actividad antioxidante ……. 370
11.2.7.3. Actividad antimicrobiana y antibacteriana ……. 370
11.2.8. Aprovechamiento de residuos para la obtención de biocarbón ……. 371
11.3. Servicios ecosistémicos ……. 372
11.3.1. Servicios de provisión ……. 373
11.3.1.1. Aporte como recurso polinífero para la apicultura ……. 373
11.3.2. Servicios de regulación ……. 374
11.3.2.1. Captura y almacenamiento de carbono ……. 374
11.3.2.2. Regulación microclimática ……. 380
11.3.2.3. Regulación de la radiación y provisión de sombra en sistemas agroforestales .. 382
11.3.3. Servicios de soporte ……. 385
11.3.3.1. Biodiversidad asociada y función de hábitat ……. 385
11.3.3.2. Continuidad de la cobertura arbórea y conectividad potencial ……. 388
11.3.3.3. Reciclaje de nutrientes ……. 390
11.3.4. Servicios culturales ……. 392
11.3.4.1. Valor cultural, identidad y memoria biocultural ……. 392
11.3.4.2. Valor escénico, paisajístico y recreativo ……. 393
11.3.4.3. Turismo educativo y valoración biocultural ……. 395
11.3.4.4. Educación e investigación ……. 397

Capítulo 12
Crecimiento, productividad y biometría forestal de *Juglans neotropica*

12.1. Fundamentos conceptuales del crecimiento y la biometría forestal ……. 401
12.1.1. Enfoque metodológico general ……. 404
12.1.2. Herramientas biométricas para el análisis del crecimiento …….. 406
12.2. Dinámica del crecimiento y productividad de *J. neotropica* …….. 407
12.2.1. Crecimiento en altura total: patrones, variabilidad e implicaciones silviculturales 407
12.2.2. Desarrollo de la altura comercial: calidad del fuste e implicaciones para la producción de madera ……. 412
12.2.3. Desarrollo del diámetro normal: crecimiento radial e implicaciones para el manejo forestal …….. 416
12.2.4. Desarrollo del área basal individual: crecimiento radial y estructura del árbol 422
12.2.5. Factor de forma de *J. neotropica* en Ecuador: variabilidad estructural e implicaciones para la estimación del volumen ……. 426
12.2.6. Crecimiento volumétrico y productividad maderable de *J. neotropica* …… 429
12.2.6.1. Construcción de la Base Nacional Volumétrica de *Juglans neotropica* (BNV-JN) 430
12.2.6.2. Desarrollo del volumen total: productividad maderable e implicaciones para el manejo silvicultural …… 433
12.2.6.3. Desarrollo del volumen comercial: rendimiento aprovechable e implicaciones para la producción de madera ……. 436
12.2.6.4. Relación entre el volumen total y el volumen comercial: eficiencia estructural del fuste ……. 439
12.2.6.5. Tablas volumétricas para la estimación del volumen de *J. neotropica* 443
12.2.7. Relaciones alométricas entre el crecimiento del fuste y la arquitectura de copa de *J. neotropica* ……. 449
12.2.8. Índice de sitio y productividad potencial de *J. neotropica* …… 451
12.2.8.1. Construcción de la Base Nacional de Índice de Sitio de *Juglans neotropica* (BNIS-JN) …….. 452
12.2.8.2. Determinación de la edad base para el desarrollo del índice de sitio .. 453
12.2.8.3. Comparación y selección de los modelos de crecimiento altura–edad 457
12.2.8.4. Curva guía nacional del índice de sitio de *J. neotropica* ……. 460
12.2.8.5. Desarrollo de las curvas nacionales del índice de sitio …… 463
12.2.8.6. Clasificación nacional del índice de sitio de *J. neotropica* …….. 465
12.2.8.7. Aplicaciones silviculturales del índice de sitio …… 467

Capítulo 13
Manejo silvicultural adaptativo y aprovechamiento sostenible de *Juglans neotropica*

13.1. Epidometría y modelación del crecimiento aplicada al manejo silvicultural de *J. neotropica* 473
13.1.1. Base Nacional Epidométrica …… 474
13.1.2. Modelación del crecimiento …….. 476
13.1.3. Curvas nacionales de crecimiento …… 478
13.1.4. Incremento Medio Anual (IMA) e Incremento Corriente Anual (ICA) …….. 481
13.1.5. Integración de la epidometría al manejo silvicultural de *J. neotropica* …….. 485
13.2. Estrategias silviculturales para diferentes objetivos y contextos de manejo …….. 488
13.2.1. Producción de madera de calidad …….. 490
13.2.2. Producción multipropósito de bienes y servicios ecosistémicos ……. 492
13.2.3 Manejo según el contexto del paisaje ……. 495

13.3. Manejo sanitario adaptativo ……..…….. 497
13.3.1. Manejo integrado de plagas y enfermedades ……..……. 499
13.3.2. Manejo de plantas trepadoras competidoras ……..…….. 503
13.3.3. Manejo de epífitas presentes en árboles adultos ……..…… 505
13.4. Aprovechamiento sostenible de *J. neotropica* …….……..……. 507
13.4.1. Criterios técnicos para definir el momento del aprovechamiento ..……... 508
13.4.2. Aprovechamiento sostenible de productos madereros …..……..…… 512
13.4.3. Criterios para el aprovechamiento sostenible de productos forestales no madereros …….…….. 514
13.4.4. Aprovechamiento sostenible de los servicios ecosistémicos …..…….. 516
13.4.5. Modelo integrado de aprovechamiento adaptativo durante el ciclo biológico de *J. neotropica* ……. 517
13.5. Integración del manejo forestal hacia la bioeconomía ……...…….…… 519

Capítulo 14
Economía, bioeconomía y cadenas de valor de *Juglans neotropica* en los paisajes andinos del Ecuador

14.1. Enfoque metodológico y fuentes de información ……..……. 523
14.1.1. Fuentes de información y análisis de costos ……..……. 523
14.1.2. Evaluación financiera y modelamiento bioeconómico …….…….. 524
14.1.3. Análisis de cadenas de valor …….…….…….. 525
14.2. Costos de producción de plántulas de *J. neotropica* en vivero …….…….. 526
14.2.1. Costos de producción y su relación con el desempeño de las plántulas en vivero 527
14.2.2. Estructura de costos de producción …….…… 529
14.3. Costos de establecimiento y manejo de plantaciones de *J. neotropica* …….. 531
14.3.1. Costos de establecimiento ……...…… 532
14.3.2. Costos de mantenimiento y manejo silvicultural …….…….…….. 534
14.4. Evaluación financiera de madera y productos no madereros ……..…… 537
14.4.1. Parámetros y escenario de evaluación financiera ……..……. 538
14.4.2. Producción e ingresos por nueces …… 540
14.4.3. Producción e ingresos por madera …….…….. 543
14.4.4. Evaluación financiera integrada de madera y nueces ……. 547
14.4.5. Análisis de sensibilidad …….…….. 550
14.4.6. Discusión e implicaciones financieras …… 552
14.5. Evaluación económica y beneficios ampliados de *J. neotropica* …….…… 554
14.5.1. De la evaluación financiera a la evaluación económica …….. 555
14.5.2. Almacenamiento de carbono como servicio ecosistémico ……..……... 556
14.5.3. Servicios ecosistémicos no monetizados …….…… 558
14.5.4. Implicaciones para la inversión, restauración productiva e incentivos ….. 561
14.6. Cadena de valor de *J. neotropica* …… 563
14.6.1. Enfoque metodológico para el análisis de la cadena de valor …… 564
14.6.2. Cadena de valor de la madera de *J. neotropica* …….. 566
14.6.3. Cadena de valor de frutos y nueces ……. 571
14.7. Valoración económica del arbolado urbano de *J. neotropica* ……. 575
14.8. Evaluación ambiental asociada a la producción de madera y nueces …….…… 576
14.9. Economía circular y aprovechamiento integral …….. 578
14.10. Bioeconomía y conservación productiva de *J. neotropica* …… 581
14.11. Barreras socioecológicas y paradoja del valor ……. 584
14.12. Implicaciones para la conservación y el desarrollo territorial …….. 587
Referencias ……..…… 594

Lista de figuras

Figura 1.1	Arquitectura para la generación e integración del conocimiento que sustenta la presente monografía científica …….……..	42
Figura 2.1	Evolución temporal de las fuentes bibliográficas utilizadas en el análisis de *Juglans neotropica*, según tipo documental …….……..	50
Figura 2.2	*Juglans neotropica* y escenarios de construcción del conocimiento sobre la especie en Ecuador ……...……..	54
Figura 3.1	Artesanías elaboradas a partir de diferentes partes de *Juglans neotropica* en distintas localidades del Ecuador ……	74
Figura 3.2	Tonalidades obtenidas mediante el teñido natural de fibras de cabuya (*Furcraea andina*) utilizando hojas de *Juglans neotropica* y otras especies vegetales empleadas por las mujeres de la comunidad de Santa Rosa, Imbabura, Ecuador ……...……..	76
Figura 3.3	Proceso artesanal de obtención de tintes naturales de *Juglans neotropica* y elaboración de artesanías con fibra de cabuya (*Furcraea andina*) en Plaza Gutiérrez, Cotacachi, Imbabura …….	77
Figura 4.1	Aspecto general de la morfología de *Juglans neotropica* durante la fructificación …….……..	90
Figura 4.2	Árbol de *Juglans neotropica* de 32 años con fuste recto, cilíndrico y con buena dominancia apical, en el Campus Yuyucocha, Imbabura ……..	91
Figura 4.3	Fuste y ramificación de un árbol adulto de *Juglans neotropica* ……..	93
Figura 4.4	Copa de un árbol adulto de *Juglans neotropica* …….…….	94
Figura 4.5	Corteza joven (izquierda) y corteza madura (derecha) de *Juglans neotropica* ……...……	95
Figura 4.6	Plántula juvenil de *Juglans neotropica* en etapa de vivero ……..……	96
Figura 4.7	Haz y envés de hojas de *Juglans neotropica* ……..	97
Figura 4.8	Inflorescencia masculina de *Juglans neotropica* …….……	98
Figura 4.9	Fruto de *Juglans neotropica* y sus principales estructuras ……..……	99
Figura 4.10	Nuez de *Juglans neotropica* con cubierta dura y leñosa …….	100
Figura 4.11	Posición filogenética de *Juglans neotropica* dentro del género *Juglans*	102
Figura 4.12	Hipótesis de la historia evolutiva *de Juglans neotropica* en relación con la evolución del género *Juglans* ……..……	105
Figura 5.1	Distribución geográfica documentada *de Juglans neotropica* en Ecuador …….……..	112
Figura 5.2	Contexto de cobertura y uso del suelo alrededor de los registros georreferenciados de *Juglans neotropica* en Ecuador ……..	114

Figura 5.3 Relaciones entre altitud, temperatura media anual y precipitación en registros georreferenciados de *Juglans neotropica* en Ecuador ……... 119
Figura 5.4 Distribución mensual de la precipitación y temperatura media en Yuyucocha durante el período 2015–2025 ……..…. 123
Figura 5.5 Desarrollo dasométrico de *Juglans neotropica* en diferentes edades y condiciones de establecimiento en Yuyucocha ……..……. 125
Figura 5.6 Ejemplar joven de *Juglans neotropica* junto a un curso de agua en Piñas Grande, El Oro ……. 129
Figura 5.7 Idoneidad ambiental potencial para *Juglans neotropica* en la provincia de Imbabura estimada mediante MaxEnt ……. 132
Figura 5.8 Cambios potenciales en la idoneidad climática de *Juglans neotropica* en Ecuador bajo escenarios de cambio climático …….…… 136
Figura 5.9 Síntesis conceptual del nicho ecológico y de la función ecológica de *Juglans neotropica* en los paisajes andinos del Ecuador ……..……. 141
Figura 6.1 Localización de los cuatro sistemas de manejo evaluados para el estudio fenológico de *Juglans neotropica* en la provincia de Imbabura ….…… 147
Figura 6.2 Calendario fenológico anual e intensidad relativa de las principales fenofases de *Juglans neotropica* en cuatro sistemas de manejo de la provincia de Imbabura ……. 150
Figura 7.1 Componentes de la calidad de las semillas de *Juglans neotropica* ……. 162
Figura 7.2 Relación entre porcentaje de germinación y procedencia altitudinal de *Juglans neotropica* ……. 165
Figura 7.3 Características fenotípicas, dasométricas y germinación de semillas de árboles semilleros de *Juglans neotropica* en tres fuentes semilleras …… 170
Figura 7.4 Modelo universitario de gestión participativa del Programa de Investigación *Juglans* (Universidad Técnica del Norte, 2021–2026) ….. 172
Figura 7.5 Variación morfológica de semillas de *Juglans neotropica* procedentes de diferentes regiones del Ecuador …….. 177
Figura 7.6 Porcentaje de germinación según el tamaño de la semilla de *Juglans neotropica* ……..……. 179
Figura 7.7 Relación entre el tamaño de la semilla y la altura de las plántulas de *Juglans neotropica* a los 120 días ……..….. 181
Figura 7.8 Preparación y respuesta de las semillas de *Juglans neotropica* en la prueba de tetrazolio ……..…… 185
Figura 7.9 Porcentaje de germinación de semillas de *Juglans neotropica* según ecosistema y sistema de manejo ……..….. 188
Figura 7.10 Estados sanitarios observados en frutos y semillas de *Juglans neotropica* durante la evaluación macroscópica en el Programa de Investigación *Juglans* ……..…… 200
Figura 8.1 Componentes fundamentales para la propagación y producción de plantas de *Juglans neotropica* ……..…… 206
Figura 8.2 Discrepancia entre viabilidad y germinación de semillas de *Juglans neotropica* ……..……. 210
Figura 8.3 Posición y técnicas de siembra de las semillas de *Juglans neotropica* … 213
Figura 8.4 Plántulas de *Juglans neotropica* producidas en fundas de polietileno en el vivero Yuyucocha, Imbabura, Ecuador ……..……. 214
Figura 8.5 Relación entre los tratamientos pregerminativos y el porcentaje de germinación de semillas de *Juglans neotropica* ……..……. 216

Figura 8.6	Modelo conceptual para la producción sostenible de plantas de calidad de *Juglans neotropica* ……..	222
Figura 8.7	Porcentaje de germinación de *Juglans neotropica* en diferentes tipos de sustrato y regiones del Ecuador ……...……	225
Figura 8.8	Porcentaje de germinación de *Juglans neotropica* según diferentes combinaciones de sustrato y tratamiento pregerminativo ……..…..	227
Figura 8.9	Variables morfológicas de plántulas de *Juglans neotropica* a los 90 días bajo diferentes tratamientos pregerminativos ……..	230
Figura 8.10	Variables morfológicas de plántulas de *Juglans neotropica* a los 90 días según los sustratos evaluados ……..……	232
Figura 8.11	Manifestaciones visuales de deficiencias nutricionales en hojas de *Juglans neotropica* en vivero ……..……	239
Figura 8.12	Síntomas foliares compatibles con un cuadro de antracnosis en plántulas de *Juglans neotropica* …….…….	241
Figura 8.13	Proceso integrado para la producción de plantas mediante propagación sexual de *Juglans neotropica* ……..…….	245
Figura 8.14	Estrategias de propagación de *Juglans neotropica*: desde la propagación sexual hasta la micropropagación ……..…….	253
Figura 9.1	Plantaciones de *Juglans neotropica* con fines comerciales en la provincia de Imbabura, Ecuador …….	258
Figura 9.2	Ensayo de conservación *ex situ* y mejoramiento genético de *Juglans neotropica* en el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Imbabura, Ecuador ……..……..	259
Figura 9.3	Núcleo multiespecífico de restauración ecológica en bosque seco interandino con participación de *Juglans neotropica*, *Caesalpinia spinosa*, *Vachellia macracantha* y *Sapindus saponaria*, Imbabura, Ecuador ……..…….	261
Figura 9.4	Plantación de enriquecimiento con *Juglans neotropica* en bosque secundario andino montano del sector La Argelia, Loja, Ecuador …..….	263
Figura 9.5	*Juglans neotropica* establecido en alineación vial como componente del arbolado urbano de Ibarra, Imbabura, Ecuador ……..…….	265
Figura 9.6	Selección de material vegetal y establecimiento de una plantación experimental de *Juglans neotropica* en el campus Yuyucocha, Imbabura, Ecuador ……..……	269
Figura 9.7	Tipos de hoyado evaluados para el establecimiento de *Juglans neotropica* en Yuyucocha, Imbabura, Ecuador ……..……..……	271
Figura 9.8	Regeneración natural de *Juglans neotropica* con potencial para manejo silvicultural y establecimiento, Cananvalle, Imbabura, Ecuador …….	275
Figura 9.9	Modalidades de aplicación de fertilizantes durante el establecimiento de *Juglans neotropica* en Yuyucocha, Imbabura, Ecuador ……..…	279
Figura 10.1	Vista parcial de una chacra andina con *Juglans neotropica* en asociación con camote (*Ipomoea batatas*), Natabuela, Imbabura, Ecuador ……..…	298

Figura 10.2 Lindero de *Juglans neotropica* asociado con granadilla (*Passiflora ligularis*) en la comunidad Los Árboles, Pimampiro, Imbabura, Ecuador 300

Figura 10.3 Lindero *de Juglans neotropica* asociado con un camino rural y cultivo de granadilla en la comunidad Los Árboles, Pimampiro, Imbabura, Ecuador ……..…….. 301

Figura 10.4 *Juglans neotropica* utilizado como soporte por sambo (*Cucurbita ficifolia*) en un sistema agroforestal de Cahuasquí, Imbabura, Ecuador 302

Figura 10.5 Cortina rompevientos multiespecífica con *Juglans neotropica* en el campus Yuyucocha, Imbabura, Ecuador ……..…… 305

Figura 10.6 Evolución temporal de un sistema agroforestal secuencial de *Juglans neotropica* y café en Pimampiro, Imbabura, Ecuador ……..…… 307

Figura 10.7 *Juglans neotropica* como componente arbóreo de un sistema agroforestal multiestratificado con *Coffea arabica* en Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador …….…….. 308

Figura 10.8 *Juglans neotropica* asociada con *Coffea arabica* var. Geisha en Cananvalle, Imbabura, Ecuador ……..…….. 310

Figura 10.9 Asociación de *Juglans neotropica* con maíz en diferentes configuraciones agrosilvícolas de los Andes ecuatorianos ……..…… 313

Figura 10.10 Arreglo agroforestal multiestrato con dominancia arbórea de *Juglans neotropica* en Natabuela, Imbabura, Ecuador …….. 316

Figura 10.11 Plantación lineal multipropósito de *Juglans neotropica* en Guananguicho Sur, Carchi, Ecuador ……..……. 318

Figura 10.12 *Juglans neotropica* proveniente de regeneración natural como componente de un sistema silvopastoril en Cuyuja, Napo, Ecuador …… 322

Figura 10.13 Lindero de *Juglans neotropica* en un sistema silvopastoril de Salcedo, Cotopaxi, Ecuador …….…….. 323

Figura 10.14 Integración de *Juglans neotropica* y *Coffea arabica* en el sistema agroforestal multiestrato de Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador ….. 326

Figura 10.15 *Morus alba* asociada con *Juglans neotropica* en el sistema agroforestal multiestrato de Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador ……..… 327

Figura 10.16 Uso de componentes leñosos del sistema agroforestal de Yuyucocha por avifauna Silvestre ……..…….. 328

Figura 10.17 Bosquete de *Juglans neotropica* en una propiedad agropecuaria de Guayllabamba, Pichincha, Ecuador …….…… 333

Figura 11.1 Características anatómicas macroscópicas de la madera de *Juglans neotropica* …….....…… 342

Figura 11.2 Características anatómicas microscópicas de la madera de *Juglans neotropica* en los tres planos de corte …….. 343

Figura 11.3 Contenido de humedad y densidad verde de la madera de *Juglans neotropica* en cuatro procedencias del Ecuador …….…… 347

Figura 11.4 Contracción y estabilidad dimensional de la madera de *Juglans neotropica* en dos procedencias del Ecuador …….……. 348

Figura 11.5 Composición química de la madera de *Juglans neotropica* en cinco individuos procedentes de Valladolid, Ecuador …….. 350

Figura 11.6 Propiedades mecánicas de la madera de *Juglans neotropica* en diferentes condiciones de humedad ……. 352

Figura 11.7 Ensayo de torneado de madera de *Juglans neotropica* en la Central de Innovación Maderera del campus Yuyucocha, Imbabura ……...……. 354

Figura 11.8	Comportamiento de la madera de *Juglans neotropica* en diferentes ensayos de trabajabilidad …….	355
Figura 11.9	Densidad básica y pérdida de peso de la albura y el duramen de la madera de *Juglans neotropica* …….……	356
Figura 11.10	Aceite de semillas de *Juglans neotropica* obtenido mediante extracción por prensado ……	362
Figura 11.11	Carbono almacenado en el componente arbóreo y detritus en sistemas productivos con *Juglans neotropica* del norte del Ecuador ……..…..	379
Figura 11.12	Variación de la temperatura y humedad relativa dentro y fuera de sistemas dominados por *Juglans neotropica* en Imbabura …….….	381
Figura 11.13	Regulación de la radiación y provisión de sombra en sistemas agroforestales con *Juglans neotropica* en Imbabura ……..…..	384
Figura 11.14	*Juglans neotropica* en la conectividad del paisaje periurbano de Chorlaví, Ibarra ……...……	389
Figura 11.15	Producción y descomposición de hojarasca de *Juglans neotropica* en dos condiciones de bosque montano andino ……..…..	391
Figura 11.16	Fila de árboles de *Juglans neotropica* de 30 años en un sendero del Campus Yuyucocha, Universidad Técnica del Norte …….….	396
Figura 12.1	Modelo conceptual del crecimiento, la productividad y la biometría forestal de *Juglans neotropica* …….	403
Figura 12.2	Cronosecuencia nacional del crecimiento en altura total de *Juglans neotropica* en Ecuador ……...……..	408
Figura 12.3	Distribución de la altura total de *Juglans neotropica* según el sistema de establecimiento y manejo en Ecuador ……..	409
Figura 12.4	Trayectoria del crecimiento potencial observado de *Juglans neotropica* en Ecuador ……..…….	411
Figura 12.5	Cronosecuencia nacional de la altura comercial de *Juglans neotropica* en Ecuador …….…….…….	413
Figura 12.6	Distribución de la altura comercial de *Juglans neotropica* según el sistema de establecimiento y manejo en Ecuador ……	414
Figura 12.7	Cronosecuencia nacional del diámetro a la altura del pecho (DAP) de *Juglans neotropica* en Ecuador ……	418
Figura 12.8	Distribución del diámetro a la altura del pecho (DAP) de *Juglans neotropica* según el sistema de establecimiento y manejo en Ecuador …	419
Figura 12.9	Árboles candidatos para selección fenotípica por crecimiento diamétrico observado de *Juglans neotropica* en Ecuador ……..….	421
Figura 12.10	Cronosecuencia nacional del área basal individual de *Juglans neotropica* en Ecuador ……...……..	423
Figura 12.11	Distribución del área basal individual de *Juglans neotropica* según el sistema de establecimiento y manejo en Ecuador ……	424
Figura 12.12	Factor de forma de *Juglans neotropica* en Ecuador y gradiente conceptual de la eficiencia volumétrica del fuste según el tipo de ecosistema y manejo ……...…….	428
Figura 12.13	Proceso metodológico para la construcción, validación y estructuración de la Base Nacional Volumétrica de *Juglans neotropica* (BNV-JN-V2)	432
Figura 12.14	Composición de la Base Nacional Volumétrica de *Juglans neotropica* según sistema de establecimiento y manejo …….……	434

Figura 12.15	Distribución del volumen total y relación entre el diámetro normal y el volumen total individual de *Juglans neotropica* …….……	435
Figura 12.16	Distribución del volumen comercial y relación entre el diámetro normal y el volumen comercial individual de *Juglans neotropica* ……..	437
Figura 12.17	Índice de Aprovechamiento del Fuste de *Juglans neotropica* (IAF-JN) según sistema de establecimiento y manejo y relación entre el volumen total y el volumen comercial ……..…….	441
Figura 12.18	Relaciones alométricas entre el crecimiento del fuste y la arquitectura de copa de *Juglans neotropica* en Ecuador …….…….	450
Figura 12.19	Proceso metodológico para la construcción de la Base Nacional de Índice de Sitio de *Juglans neotropica* (BNIS-JN) ……..….	453
Figura 12.20	Distribución de edades de los árboles dominantes incluidos en la Base Nacional de Índice de Sitio de *Juglans neotropica* (BNIS-JN) ……...	455
Figura 12.21	Comparación del desempeño de los modelos de crecimiento altura–edad evaluados para el desarrollo del índice de sitio de *Juglans neotropica* …	458
Figura 12.22	Curva guía nacional del índice de sitio para *Juglans neotropica* en Ecuador …….……..	461
Figura 12.23	Curvas nacionales del índice de sitio para *Juglans neotropica* en Ecuador …….……..	464
Figura 12.24	Aplicaciones silviculturales del índice de sitio para *Juglans neotropica* en Ecuador …….……..	469
Figura 13.1	Curvas nacionales de crecimiento para altura dominante, diámetro normal y área basal individual …….	478
Figura 13.2	Curvas nacionales de crecimiento del volumen comercial y del volumen total individual ……..…..……..	479
Figura 13.3	Curva nacional de expansión del área de copa …….	480
Figura 13.4	Curvas del Incremento Medio Anual (IMA) y del Incremento Corriente Anual (ICA) para altura dominante, diámetro normal y área basal individual ……...…….	482
Figura 13.5	Curvas del Incremento Medio Anual (IMA) y del Incremento Corriente Anual (ICA) para área de copa ……..……	483
Figura 13.6	Curvas del Incremento Medio Anual (IMA) y del Incremento Corriente Anual (ICA) para volumen comercial y volumen total individual ……..	484
Figura 13.7	Integración gráfica de la dinámica de crecimiento y las intervenciones de manejo de *Juglans neotropica* ……	488
Figura 13.8	Marco conceptual y estratégico para el manejo silvicultural de *Juglans neotropica* …….……..	490
Figura 13.9	Secuencia del manejo silvicultural para la producción de madera de calidad en *Juglans neotropica* …….	492
Figura 13.10	Modelos de conducción silvicultural de *Juglans neotropica* según el objetivo de manejo ……...	494
Figura 13.11	Aplicación de las estrategias de manejo silvicultural de *Juglans neotropica* en diferentes contextos del paisaje …….	497
Figura 13.12	Ciclo del manejo sanitario adaptativo de *Juglans neotropica* ……	499
Figura 13.13	Adulto de *Gretchena garai*, principal insecto plaga asociado *a Juglans neotropica* en Ecuador …….	500

Figura 13.14	Cancro con exudación en el tronco de *Juglans neotropica* registrado en un sistema agroforestal de la parroquia El Carmelo, provincia del Carchi, Ecuador …….……..	502
Figura 13.15	Colonización progresiva de *Thunbergia alata* en plantaciones de *Juglans neotropica* ……..	504
Figura 13.16	Comunidades de epífitas asociadas a árboles adultos de *Juglans neotropica* en diferentes contextos ecológicos del Ecuador…….	506
Figura 13.17	Modelo operativo para la selección de estrategias de aprovechamiento sostenible de *Juglans neotropica* según el objetivo de manejo del rodal	509
Figura 13.18	Secuencia técnica para el aprovechamiento sostenible de productos madereros de *Juglans neotropica* ……..……..	513
Figura 13.19	Aprovechamiento integral del fruto de *Juglans neotropica* y potencial de sus principales productos forestales no madereros ……..	515
Figura 13.20	Modelo integrado de aprovechamiento adaptativo durante el ciclo biológico de *Juglans neotropica* bajo el enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM) ……..……	519
Figura 13.21	Modelo conceptual del aprovechamiento sostenible de *Juglans neotropica*, adaptado del enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM) desarrollado por Guariguata, 2013 y Sabogal et al., 2013, con énfasis en la bioeconomía y la economía circular ……	520
Figura 14.1	Secuencia de aprovechamiento y agregación de valor de la madera de *Juglans neotropica* en Ecuador ……..…….	571
Figura 14.2	Proceso de transformación de la nuez de *Juglans neotropica* y comercialización de las nogadas en Ibarra, Ecuador ……..	573
Figura 14.3	Sombrero elaborado con fibra de cabuya (*Furcraea andina*) y teñido con colorantes naturales obtenidos de *Juglans neotropica* …….	580

Lista de tablas

Tabla 2.1	Tasas anualizadas de las fuentes bibliográficas utilizadas en el análisis de *Juglans neotropica*, según tipo documental y periodo de publicación ……..	48
Tabla 2.2	Distribución del corpus bibliográfico según tipo documental y relación temática con *Juglans neotropica* ……..……..	55
Tabla 2.3	Distribución de las tesis y los trabajos de titulación según la institución de procedencia ……....…….	57
Tabla 4.1	Clasificación taxonómica de *Juglans neotropica* ……..……	87
Tabla 4.2	Principales sinónimos botánicos asociados a *Juglans neotropica* …….	88
Tabla 4.3	Especies representativas del género *Juglans*, distribución y sección filogenética ……...……	88
Tabla 4.4	Nombres comunes de *Juglans neotropica* en su área de distribución ….....	89
Tabla 4.5	Validación de la arquitectura de *Juglans neotropica* según los caracteres diagnósticos del modelo de Rauh ……..…….	92
Tabla 5.1	Ecosistemas del Ecuador continental asociados con los registros de *Juglans neotropica* ……...…….……	127
Tabla 6.1	Calendario fenológico comparativo de *Juglans neotropica* en cuatro sistemas de manejo de la provincia de Imbabura ……..	147
Tabla 6.2	Características ambientales de los sistemas de manejo evaluados en la provincia de Imbabura ……...……..	150
Tabla 6.3	Implicaciones del conocimiento fenológico para el manejo y la conservación de *Juglans neotropica* ……..……	156
Tabla 7.1	Germinación de semillas de *Juglans neotropica* según la fuente semillera ..	167
Tabla 7.2	Promedios de peso, longitud y diámetro de semillas de *Juglans neotropica* por región y categoría de tamaño en el Ecuador ……..…….	177
Tabla 7.3	Resumen de los principales indicadores de calidad fisiológica de semillas de *Juglans neotropica* evaluados en Imbabura (2023–2025) ……..…..….....	190
Tabla 7.4	Relación tallo:raíz en biomasa y longitud de plántulas de *Juglans neotropica* ……...……..	192
Tabla 7.5	Principales componentes de la evaluación sanitaria de semillas de *Juglans neotropica*……	199
Tabla 8.1	Comparación técnica de los tratamientos pregerminativos utilizados en *Juglans neotropica* ……...……	221
Tabla 8.2	Propiedades físicas y químicas recomendadas para sustratos destinados a la producción de plántulas de *Juglans neotropica* ……	223

Tabla 8.3 Requerimiento hídrico estimado por plántula de *Juglans neotropica* en vivero durante un ciclo de seis meses ……..…. 238
Tabla 8.4 Comparación técnica de los métodos de propagación vegetativa evaluados para *Juglans neotropica* ……..……. 250
Tabla 10.1 Principales componentes y grupos funcionales del sistema agroforestal multiestrato de Yuyucocha ……..……. 324
Tabla 11.1 Características cromáticas de tintes obtenidos de diferentes órganos de *Juglans neotropica* aplicados a fibra de alpaca ……..…….. 359
Tabla 12.1 Bases nacionales desarrolladas para el análisis del crecimiento, la productividad y la biometría forestal de *Juglans neotropica* ……..…. 405
Tabla 12.2 Estadísticos descriptivos de la altura total de *Juglans neotropica* según clases de edad en Ecuador ……..…….. 410
Tabla 12.3 Estadísticos descriptivos de la altura comercial de *Juglans neotropica* según clases de edad en Ecuador ……. 415
Tabla 12.4 Estadísticos descriptivos del diámetro normal de *Juglans neotropica* según clases de edad en Ecuador …….…….. 420
Tabla 12.5 Estadísticos descriptivos del área basal individual de *Juglans neotropica* según clases de edad en Ecuador …….…… 425
Tabla 12.6 Síntesis nacional de los estudios utilizados para determinar el factor de forma de *Juglans neotropica* en Ecuador …….…… 427
Tabla 12.7 Factores de forma de referencia para la estimación del volumen de *Juglans neotropica* según las condiciones de crecimiento evaluadas en Ecuador …. 429
Tabla 12.8 Estadísticos descriptivos del volumen total, volumen comercial e Índice de Aprovechamiento del Fuste (IAF-JN) de *Juglans neotropica* según sistema de establecimiento y manejo en Ecuador …….……. 442
Tabla 12.9 Comparación de métodos de estimación del volumen individual *de Juglans neotropica* en una plantación forestal de Loja …….…….. 444
Tabla 12.10 Tabla volumétrica de una entrada para *Juglans neotropica* obtenida mediante el modelo de Hohenadl–Krenn en sistemas agrosilvícolas de Imbabura …….……. 446
Tabla 12.11 Tabla volumétrica de dos entradas para *Juglans neotropica* obtenida mediante el modelo de Stoate en sistemas agrosilvícolas de Imbabura …… 447
Tabla 12.12 Estadísticos descriptivos de la Base Nacional de Índice de Sitio de *Juglans neotropica* (BNIS-JN) …….……. 456
Tabla 12.13 Comparación estadística de los modelos altura–edad ajustados para la construcción del índice de sitio de *Juglans neotropica* …… 459
Tabla 12.14 Clasificación preliminar del índice de sitio de *Juglans neotropica* en Ecuador (edad base: 30 años) …… 466
Tabla 13.1 Caracterización descriptiva de la Base Nacional Epidométrica de *Juglans neotropica* utilizada para el ajuste de los modelos de crecimiento ……... 474
Tabla 13.2 Cobertura geográfica y representatividad de la Base Nacional Epidométrica de *Juglans neotropica* ……...…… 475
Tabla 13.3 Procedencia geográfica de los registros utilizados para construir la Base Nacional Epidométrica de *Juglans neotropica* ……. 475

Tabla 13.4 Comparación de los modelos candidatos evaluados para la construcción de las curvas nacionales de crecimiento de *Juglans neotropica* …… 476
Tabla 13.5 Funciones matemáticas y parámetros estimados para la modelación del crecimiento de *Juglans neotropica* ……..…….. 477
Tabla 13.6 Edad de culminación del Incremento Medio Anual (IMA) e interpretación silvicultural para las principales variables dasométricas de *Juglans neotropica* ……. 485
Tabla 13.7 Orientaciones silviculturales referenciales derivadas del análisis epidométrico de *Juglans neotropica* ……. 486
Tabla 13.8 Peso y proporción de las partes del fruto de *Juglans neotropica* con potencial como PFNM …….…… 516
Tabla 14.1 Costos unitarios y variables de germinación y crecimiento de plántulas de *Juglans neotropica* en dos estudios experimentales …….…… 528
Tabla 14.2 Estructura de costos de producción de plántulas de *Juglans neotropica* según tratamiento pregerminativo en el vivero Yuyucocha ……..…. 530
Tabla 14.3 Referencias documentales de inversión inicial asociada con el establecimiento y manejo temprano de plantaciones de *Juglans neotropica* en Ecuador ……..…….…… 533
Tabla 14.4 Costos estimados de mantenimiento y manejo silvicultural de una plantación de *Juglans neotropica* destinada a la producción de madera de calidad ……..…… 535
Tabla 14.5 Parámetros del escenario de evaluación financiera de una plantación de *Juglans neotropica* ……...…… 539
Tabla 14.6 Producción potencial de nueces durante la fase de producción comercial en el escenario de manejo de *Juglans neotropica* ……. 541
Tabla 14.7 Secuencia de raleos considerada en el escenario financiero de *Juglans neotropica* …….…… 544
Tabla 14.8 Parámetros utilizados para la estimación del ingreso por madera en la cosecha final de *Juglans neotropica* ……...…….. 546
Tabla 14.9 Flujos principales utilizados en la evaluación financiera integrada de una plantación de *Juglans neotropica* ……. 548
Tabla 14.10 Indicadores financieros del escenario integrado de producción de madera y nueces de *Juglans neotropica* …….……. 549
Tabla 14.11 Sensibilidad de los indicadores financieros de la plantación de *Juglans neotropica* ante variaciones de los principales parámetros …….…….. 550
Tabla 14.12 Sensibilidad financiera frente a diferentes tasas de descuento …….. 551
Tabla 14.13 Efecto del año de inicio de la producción comercial de nueces sobre los indicadores financieros ……. 552
Tabla 14.14 Clasificación de los beneficios de *Juglans neotropica* según sus posibilidades de valoración económica …….…….. 556
Tabla 14.15 Carbono almacenado en plantaciones de *Juglans neotropica* con y sin asociación con café en Pimampiro, Imbabura …….. 557
Tabla 14.16 Servicios ecosistémicos asociados con *Juglans neotropica* no incorporados monetariamente en la evaluación financiera …… 560

Tabla 14.17 Interpretación de los principales beneficios económicos y ecosistémicos de sistemas con *Juglans neotropica* según su orientación ……. 563

Tabla 14.18 Productos, localidades y componentes considerados en el análisis de la cadena de valor de *Juglans neotropica* en Imbabura ……..….. 566

Tabla 14.19 Principales actores y funciones identificados en la cadena de valor de la madera de *Juglans neotropica* en Imbabura ……..…….. 569

Tabla 14.20 Principales actores y funciones identificados en la cadena de valor de frutos y nueces de *Juglans neotropica* en Imbabura …….……. 574

Prólogo

Escribir el prólogo de una obra dedicada íntegramente al nogal andino, *Juglans neotropica* Diels, constituye una oportunidad para acercarnos no solamente a una especie forestal de los Andes, sino también a una parte de la historia natural, productiva y cultural de sus territorios. Conocido en distintos lugares como nogal o tocte, este árbol ha acompañado durante generaciones a las poblaciones andinas y ha formado parte de sus paisajes, sistemas productivos, prácticas tradicionales y formas de relacionarse con la naturaleza.

Desde la perspectiva de quienes valoramos y estudiamos las especies andinas, resulta especialmente significativo encontrar una obra que reúna, organice y articule el conocimiento acumulado durante décadas sobre una especie que, pese a su importancia, todavía no ocupa el lugar que merece en las políticas de conservación, el manejo forestal y las estrategias de desarrollo de nuestros territorios. El nogal andino *Juglans neotropica* Diels en Ecuador: Bases científicas para la conservación, el manejo forestal y la bioeconomía sostenible de los paisajes andinos responde precisamente a esa necesidad. Su principal mérito consiste en reunir aportes de universidades, instituciones, investigadores, estudiantes, productores y territorios del Ecuador, y convertir investigaciones que durante mucho tiempo permanecieron dispersas en una visión integral de la especie.

Esta tarea va más allá de la recopilación bibliográfica. Durante años se generaron observaciones, tesis, trabajos de campo, experiencias productivas y publicaciones científicas relacionadas con la distribución, ecología, propagación, crecimiento, manejo y aprovechamiento del nogal. El desafío consistía en relacionar esos conocimientos y transformarlos en una base útil para comprender mejor la especie y orientar decisiones sobre su futuro.

Una de las fortalezas de la publicación es precisamente ese tránsito del dato al conocimiento y del conocimiento a la posibilidad de actuar. La información adquiere verdadero significado cuando permite comprender dónde se encuentra el nogal, bajo qué condiciones se desarrolla, cómo se reproduce y crece, cómo responde a diferentes ambientes y procedencias, cómo puede manejarse y qué bienes y servicios proporciona.

En este proceso destacan avances importantes de la investigación sobre *Juglans neotropica* en el Ecuador: el conocimiento de su distribución geográfica y sus condiciones ecológicas; los estudios de crecimiento, biometría y calidad de sitio; las investigaciones sobre semillas, propagación y sanidad; y el análisis de los sistemas agroforestales, los servicios ecosistémicos y las cadenas de valor asociadas con la especie. En conjunto, estos aportes permiten superar una visión centrada únicamente en describir el árbol y avanzar hacia otra que busca comprenderlo para conservarlo, manejarlo y aprovechar responsablemente su potencial.

La distribución geográfica del nogal representa mucho más que la elaboración de un mapa. Relacionar su presencia con la altitud, el clima, la precipitación, la cobertura del suelo y otras condiciones ambientales aporta elementos para interpretar su idoneidad ecológica y su posible comportamiento futuro. Esta información adquiere especial relevancia frente al cambio climático y plantea una pregunta ineludible: ¿dónde y bajo qué condiciones podrá mantenerse el nogal andino, y en qué lugares deberían concentrarse los esfuerzos de conservación, restauración y establecimiento? El estudio de su distribución, ecología, vulnerabilidad y resiliencia presentado en esta obra ofrece elementos valiosos para comenzar a responderla.

El nogal andino, sin embargo, no puede comprenderse únicamente desde la perspectiva forestal. Uno de los aspectos que considero más valiosos del libro es su capacidad para ampliar la mirada y reconocer al árbol como parte del patrimonio biocultural de los territorios andinos. La obra recupera elementos de la historia ambiental, los usos tradicionales, los conocimientos locales, la artesanía en madera, la gastronomía, los tintes y la tradición oral. También muestra su relación con sistemas agrícolas y agroforestales y con paisajes en los que las actividades humanas y la naturaleza han mantenido, durante generaciones, una estrecha relación.

Esta perspectiva recuerda algo fundamental: conservar una especie no significa únicamente proteger individuos o poblaciones. También implica conservar los conocimientos, las prácticas, los paisajes, los valores culturales y las relaciones que las sociedades han construido alrededor de ella.

Otro mérito de la publicación es mostrar que el conocimiento científico no surge de manera aislada. Detrás de sus páginas existe una trayectoria colectiva en la que han participado universidades de distintas regiones del Ecuador, investigadores, docentes, estudiantes de pregrado y posgrado, propietarios de árboles y fincas, comunidades, técnicos e instituciones. Las tesis y los trabajos de titulación desempeñaron un papel relevante en este proceso, al generar una base de conocimiento que posteriormente encontró continuidad en investigaciones y publicaciones especializadas.

El libro permite reconocer así la evolución de una comunidad científica alrededor de una especie forestal. Estudios y observaciones inicialmente dispersos adquirieron continuidad, articulación y especialización hasta configurar una mirada interdisciplinaria sobre *Juglans neotropica*. Allí se encuentra uno de los mayores aportes de la obra: relacionar conocimientos que alcanzan un significado mucho más amplio cuando son analizados en conjunto.

La distribución se comprende mejor cuando se relaciona con el clima y las condiciones ambientales; el conocimiento de las semillas adquiere mayor utilidad cuando se consideran su procedencia, calidad y comportamiento; y las mediciones de crecimiento cobran verdadero valor silvícola cuando permiten orientar el manejo y estimar la productividad. De igual manera, los sistemas agroforestales pueden apreciarse en toda su dimensión cuando se examinan sus productos, su biodiversidad y sus servicios ecosistémicos, mientras que los productos forestales encuentran nuevas posibilidades al ser analizados dentro de cadenas de valor y desde una perspectiva de bioeconomía.

Esta visión integral se refleja en la estructura del libro. Después de establecer su marco general, la obra examina el estado del conocimiento y la dimensión histórica y biocultural del nogal; posteriormente aborda su botánica, filogenia, distribución, ecología, fenología, semillas y propagación. Los capítulos siguientes analizan las plantaciones, los sistemas agroforestales, los productos y servicios ecosistémicos, el crecimiento, la biometría, el manejo silvicultural y el aprovechamiento sostenible. Finalmente, se incorporan las dimensiones económicas relacionadas con la cadena de valor, la economía circular, la bioeconomía y las soluciones basadas en la naturaleza.

El árbol aparece, de este modo, observado como organismo biológico, recurso genético, componente del bosque, elemento de los sistemas productivos, patrimonio cultural y fuente de bienes, servicios y oportunidades económicas. Esta mirada integral resulta particularmente necesaria para una especie de uso múltiple como el nogal andino.

Conservarlo no puede limitarse a proteger los árboles que todavía permanecen. Significa conocer y conservar su diversidad, favorecer su regeneración, producir semillas y plantas de calidad, recuperar su presencia en los paisajes donde ha disminuido, incorporarlo adecuadamente en sistemas agroforestales y plantaciones, manejar los árboles existentes y generar oportunidades económicas compatibles con su permanencia.

En este punto adquieren especial importancia la economía y la bioeconomía. La madera y los frutos representan solamente una parte del potencial del nogal. Los productos forestales no madereros, los servicios ecosistémicos, la biodiversidad, el carbono, los usos culturales y las posibilidades de economía circular amplían considerablemente la manera de valorar la especie. La conservación de los árboles andinos será más sólida cuando la sociedad comprenda que protegerlos no significa necesariamente excluirlos de toda actividad humana, sino aprender a relacionarse con ellos de manera responsable, generando beneficios para las poblaciones y contribuyendo a construir paisajes más diversos, productivos y resilientes.

Las páginas de esta obra no pretenden cerrar la investigación sobre *Juglans neotropica*. Por el contrario, permiten apreciar cuánto se ha avanzado y cuánto queda todavía por conocer. La genética, la adaptación frente al cambio climático, el mejoramiento, la restauración, la productividad, la sanidad, el manejo, los mercados y los servicios ecosistémicos plantean nuevas preguntas y posibilidades de investigación. Ese es también uno de los valores de una obra científica: no solamente ofrecer respuestas, sino ayudarnos a reconocer las preguntas que aún debemos formular y resolver.

En un momento en que los ecosistemas andinos enfrentan profundas transformaciones y resulta cada vez más necesario construir sistemas productivos sostenibles y resilientes, las especies forestales nativas adquieren una renovada importancia. El nogal andino reúne características biológicas, ecológicas, culturales y productivas que justifican continuar invirtiendo conocimiento, investigación y esfuerzos en su conservación, manejo y valoración.

Por ello, considero que esta publicación constituye un aporte significativo para investigadores, estudiantes, profesionales forestales y ambientales, técnicos, productores, propietarios de fincas, comunidades e instituciones responsables de la gestión de nuestros

territorios. Puede contribuir a conocer mejor al nogal andino y, sobre todo, a transformar ese conocimiento en mejores decisiones.

Quisiera destacar el esfuerzo de quienes hicieron posible esta obra y, particularmente, el compromiso de sus autores por reunir y poner en valor un conocimiento que se encontraba disperso y merecía ser integrado y difundido. Que este libro contribuya a que el nogal andino sea mejor conocido, valorado y adecuadamente manejado será ya un logro importante. Que, además, favorezca la recuperación de su presencia en los paisajes andinos y fortalezca una cultura de conservación y aprovechamiento responsable constituirá un aporte aún mayor.

Porque, en definitiva, el conocimiento alcanza su mayor significado cuando deja de ser solamente información y se convierte en una herramienta para comprender nuestro territorio y decidir responsablemente sobre su futuro.

Mi reconocimiento y felicitación a Mario Añazco, Hugo Vallejos, Guillermo Valera y Oscar Eraso por esta valiosa publicación y por su aporte al conocimiento y la valoración del nogal andino.

Agradezco especialmente a mi amigo Mario Añazco por la confianza y por brindarme la oportunidad de prologar esta obra, que espero contribuya a renovar el interés por el nogal andino y por su importancia para nuestros territorios.

David Jesús Ocaña Vidal
Director ejecutivo de la Fundación Por las Montañas, Perú
Asesor forestal del Proyecto Desarrollo Forestal Campesino en Ecuador, ejecutado con apoyo de la FAO (1993–1998)

Foreword

It is with great pleasure that I prepare this Foreword in English that will accompany a "Presentación" in Spanish and a "Kallari rimay" in Quichua to introduce this invaluable book focused on the iconic species, *Juglans neotropica*. For nearly 40 years, I have followed closely the impressive professional career of Dr. Mario Añazco, one of the co-authors of this volume and an esteemed friend and colleague. Dr. Añazco and I have shared a passion for Andean forestry, particularly conducted with highland communities and often with native species such as Nogal or the Andean walnut tree. While reading these pages I reflected on my first efforts to cultivate Nogal in Colombia where I helped manage tree nursery devoted to native species.

As you explore the chapters of this book, you will soon understand why the authors made the decision to develop an extensive volume on Nogal. *Juglans* spp. are distributed around the world and revered in every region in which they are found. Indeed, the authors point out that *Juglans* can be interpreted as the "nut of Jupiter" or the divine nut."

In the Andean region of Ecuador, Nogal is widely distributed occupying niches at different altitudinal gradients, expressing its best development in conditions that favor its growth. That said, this book is about much more than the production, growth, and yield of Nogal. The authors have opted to pursue a multi-disciplinary exploration of Nogal, tapping into a diversity of publications in their extensive literature review. Over four hundred references were compiled distributed across different dimensions of this research endeavor: political, social, cultural, geographical, economic, and technical, among others. This major effort involved the review of scientific publications, graduate and undergraduate thesis, technical reports, books, manuals, and institutional documents. Through this review, the authors were able to provide a detailed synthesis of the state of knowledge in different facets of their analysis and also identify important gaps in available knowledge. To their credit, the authors undertook special efforts while developing the book to at least partially fill in some of these gaps and provide useful guidance to students and scholars who choose to explore these topics/themes in more depth moving forward.

This volume brings together data from different regions of Ecuador on the growth and yield of nogal under diverse production systems and management regimes. Chapter 12, "Crecimiento, productividad y biometría forestal de *Juglans neotropica*," and Chapter 13, "Manejo silvicultural adaptativo y aprovechamiento sostenible de *Juglans neotropica*," provide invaluable information on the site conditions that favor the growth of nogal and on the key considerations for its silvicultural management according to the objectives for which it is cultivated. Particular attention is given to site selection, tree spacing, stand density management through thinning, pruning for different purposes, and sustainable harvesting.

Recognizing the cultural importance of Nogal among Indigenous communities, the authors also sought out traditional knowledge and experiences with the species. Traditional knowledge spans the integration of Nogal trees into productions systems and the multiple good and services the species provides, for example, precious wood, walnuts, culinary and medicinal uses, dyes, wildlife habitat, contributions to ecological connectivity, carbon sequestration, among others. The book makes clear that the most promising path for the current and future conservation of Nogal – which has suffered a steep decline in most regions of the Ecuadorian highlands – will

involve taking advantage of both traditional and current scientific knowledge. Thus, the authors emphasize the importance of both interdisciplinary and transdisciplinary knowledge in efforts to expand the integration and increased utilization of Nogal across Ecuadorean Andean landscapes.

The decline of Nogal in Ecuador has led hundreds of skilled artisans to abandon their craft. To sustain the traditions associated with Nogal, the authors call for expanded efforts to further biocultural conservation. These initiatives will have to be undertaken as the Andean region faces uncertainty related to climate change and the scenarios that will play out over time. Thus, as is pointed out, biocultural conservation will have to carefully consider how to bolster the resilience of the species and the production systems in which it is integrated. It is hoped that these efforts will be undertaken with a sense of urgency, considering the remarkable attributes and cultural importance of Nogal. The current book will be an invaluable source of knowledge and information to organizations, researchers, students, and practitioners that take on this rewarding and important work.

Glenn Galloway, PhD
Director, Master of Sustainable Development Practice (MDP) Program
Center for Latin American Studies / Center for African Studies
University of Florida

Kallari rimay

Tukti yura kawa rimashpaka ninchimi, imashina ñukanchik llaktakunawan, runakunakan, tandarishpa kawsayta. Manara yachaykunata maskak runakuna shamukpiy, mana kilkaykuna tiyakpi, llaktakunamanta runakuna ñami kay yurataka riksishpa karka. Paypa murukunata, kaspitapash, tukuyllatami chawchayta shinashpa kawsay shamuska kuna pachakaman.

Chaymanta, tuktita riksichiy kamukuna mana rikuchinachu yuratallaka, willachinami imashina kay yuraka tinkiryn runakunawan, wiñaykawsaywan, ayllullaktakunawampash, charin kawsaypika, shinallata, maypillamik kay yuraka wiñakun.

Yurakumanta riksiykunataka yachakurinmi tawka watakunapi imashina wiñakta rikushpa, pachamamawan kawsashpa, wawamanta rukuyankaman rikushpak. Shinallata, tuktitaka riksinchimi taripaykunta rurashpa, kaypi rikunchi tukuylla kay yurapak wiñayta, imashina murukuna, kaspipash wachariyta. Chaymanta, ishkanti yachaykuna tarinakurinashpami sinchiyachinka tukuy runakunapa yachayta.

Kay kamumi kan tukuylla yachay tarishkakunata kilkashka rikuchiy Ecuadorpi tuktimanta.

Yalishka washa watakumantami tiyashka tawka yachaykuna chakchurisha, kay yachaykunami rikurin llaktakunamanta, tukti yurapa chariyukuna; yachana wasipipash, chaypi kilkak runakupana tarishkakunami kallarichin kay yuramanta taripaykunata maskay kallarita.

Kay purik rikurin ñan laya, kallaripi rikunchi tukti ima tukukta, katishpa kay atikkllakunata imashinami llaktakunapa munaykunata, pakatachin. Kay paktachikunami yachaykunama tukun, shinallata kay riksiy kawsayta sinchiyachichunka, runakunaka alli yuyaykunatami charina. **Kay kamuka, chay ñantami katinkapa munan**.

Tukuy taripaykuna kay watakunapi rurashkapash, rikuchinmi maypillami tukti yura tiyakta Ecuador mama llakta ukupi, imashina wiñan, imashina murukuna wacharinkunata, imashina mushuk uchilla yurakta wiñachinatapash, ima unkuykumi yurapi tiyan, urapichi, kawapichi alli wiñan.

Tukti yurata riksishpaka, runakunapak kawsayta riksinkimi.

Tuktika runakunan karanmy muruta, kaspita, pankatapash, shinallata pampa makñakuapi, pampa ukupipashmi tarpushka kan; wiwakunapa, runakunapash llantun, tuktika sumak kawsaytami karan tukuy kay allpa mmai kausakkunaman.

Chaymanta, kay kamuka yachakun, rikuchin, kullkita tiyarinatapash, riksichin imasha kamaykunata rurana kan tukti yurata, alli wiñashka kawa, runakunaman alli kawsayta tarichun.

Kamukpika ampayupak yachachi tiyan, tukuylla riksiykunata tantachishpa killkashkakunaka mana shuk llaktala, shuk runalla, ruray ushanchu, tukuylla taripakunami tantadarishpa rurana, chaypimi tantadarin yachakukkuna, yachachikuna, yurata tarpushka charikuna.

Ima rikushkakuna, maypi muru kapishka, tuktita kamaykuna, yachakuy tukuchiy kamukuna rurashkahunami, kay riksichitaka sinchiyachin.

Tukti yuraka, ñukanchi pampakunaman, ñukanchi urkukunapami kan, ñukanchi mamallakta kawsaypa yurakuna kan. Chaymanta kamaykunata sinchiyachina kan, ama chinkachun kay puntamanta kawsashaka yura.

Tarpuychi chakrapi, pampa makñapi, maypi yurakuna illakpi, chashna ñukanchik kawsayta alli rikurichun, chaypaka, alli yurata akllaychi, may sumak wiñachun.

Kay tandaripi, allpamanta, riksimanta, shuk kachanata willachinmi:

Riksichikunata kay kamupi killkashkakuna llaktakunaman kutichikpi chayachun, mutsurik kachuk killkakupak, yachachik kunapa, yachakuk kunapa, shinallatan maykan kamuy runakunapapash.

Shinallata, mushuk wiñakuna riksichun tuktita, kamay rurayta sinchiyachichun, chakrakuna may sumak kachun, yuyachun runakawsaypi, shinallata katikunaman yachachichun.

Luis Pacífico Fichamba Lema
Gerente propietario de Ecokawsay Productos y Servicios Turísticos
Peguche, Otavalo, Ecuador
Exdocente de la Universidad Intercultural de las Nacionalidades y Pueblos Indígenas
Amawtay Wasi

Presentación

Este libro nace de una convicción compartida: para conservar, manejar y valorar una especie forestal es necesario conocerla de manera integral. En el caso del nogal andino (*Juglans neotropica*), ese conocimiento se encontraba distribuido entre investigaciones científicas, tesis universitarias, informes técnicos, experiencias de campo y saberes mantenidos por comunidades, productores, artesanos y familias de distintas regiones del Ecuador. Reunir, analizar y relacionar esas contribuciones constituyó el punto de partida de esta obra.

Su elaboración representa la culminación de un proceso académico y científico desarrollado durante varios años y fortalecido por el Programa de Investigación *Juglans* de la Universidad Técnica del Norte. Desde su formulación en 2021, este programa permitió articular investigación, docencia, vinculación y gestión alrededor de una especie nativa cuya importancia trasciende el ámbito estrictamente forestal. Los proyectos, trabajos de titulación, recorridos de campo, mediciones, ensayos, análisis de laboratorio e intercambios con investigadores y actores locales hicieron posible construir una visión cada vez más amplia del nogal andino y de su relación con los paisajes ecuatorianos.

La preparación del libro también exigió mirar más allá de los resultados de un solo programa o institución. Por ello, se integraron contribuciones generadas durante décadas por universidades, centros de investigación, organismos públicos y privados, organizaciones locales y especialistas nacionales e internacionales. Entre las instituciones ecuatorianas destaca el trabajo realizado por la Universidad Técnica del Norte, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y la Universidad Nacional de Loja, cuyos aportes han sido fundamentales para ampliar el conocimiento sobre la propagación, el crecimiento, la genética, el manejo, la restauración y los sistemas productivos asociados con la especie.

La obra aborda al nogal andino como parte de sistemas socioecológicos complejos. No se limita a describir un árbol ni a reunir información forestal: examina sus relaciones con la historia, la cultura, los conocimientos tradicionales, la producción, los medios de vida y la sostenibilidad de los paisajes. Esta perspectiva permite comprender por qué *J. neotropica* puede estar presente en bosques naturales, fincas, linderos, potreros, plantaciones, sistemas agroforestales y espacios urbanos y periurbanos, y por qué su significado varía según las condiciones ecológicas y culturales de cada territorio.

Entre los aportes reunidos se encuentran la primera distribución geográfica georreferenciada de la especie a escala nacional; el primer índice de sitio desarrollado para *J. neotropica* en el Ecuador; la determinación de su modelo arquitectónico; la evaluación del factor de forma y de modelos volumétricos en diferentes condiciones de crecimiento; y nuevos conocimientos sobre fenología, semillas, propagación, sanidad, crecimiento, turnos biológicos, sistemas agroforestales, servicios ecosistémicos, cadena de valor y bioeconomía. En conjunto, estos resultados aportan bases científicas para orientar su conservación, restauración, producción y aprovechamiento sostenible.

Sin embargo, los resultados presentados no deben interpretarse como respuestas definitivas. La diversidad ambiental y sociocultural del Ecuador impide formular una única receta para el manejo del nogal. Su comportamiento cambia entre regiones, altitudes, ecosistemas y formas de uso del suelo. A ello se suman los efectos actuales y futuros del cambio climático, que plantean nuevas preguntas sobre la permanencia de sus poblaciones, la idoneidad de los sitios y las posibilidades de restauración y establecimiento de la especie. Por esta razón, el libro propone una base para continuar investigando, comparando experiencias y adaptando las decisiones de manejo a cada contexto territorial.

La inclusión de tres prólogos —en español, inglés y kichwa— expresa también el espíritu con el que fue concebida esta publicación. Las contribuciones de David Ocaña, Glenn Galloway y Luis Fichamba sitúan la obra desde distintas perspectivas lingüísticas, culturales y profesionales. Su presencia reconoce que el conocimiento sobre el nogal andino no pertenece a un único ámbito: se construye mediante el diálogo entre ciencia, práctica profesional, experiencia territorial y memoria cultural.

Esta obra está dirigida a investigadores, docentes, estudiantes, técnicos, productores, gestores públicos, organizaciones comunitarias y a todas las personas interesadas en los bosques andinos y sus especies nativas. Esperamos que sus contenidos sean útiles para formular nuevas preguntas de investigación, orientar procesos de propagación y establecimiento, mejorar las prácticas de manejo, fortalecer iniciativas de restauración, apoyar la formación profesional y contribuir a decisiones públicas y privadas mejor fundamentadas.

Como autores, reconocemos que este libro fue posible gracias al trabajo acumulado de numerosas personas. Cada investigación consultada, cada parcela medida, cada semilla evaluada, cada árbol localizado, cada fotografía, testimonio y experiencia compartida contribuyó a su construcción. Expresamos nuestro reconocimiento a las instituciones, investigadores, estudiantes, comunidades, productores, artesanos y colaboradores que han generado, conservado y transmitido conocimiento sobre el nogal andino.

Ponemos esta obra a disposición de la sociedad con la expectativa de que el conocimiento reunido no permanezca únicamente en sus páginas. Aspiramos a que se convierta en una herramienta para valorar al nogal, conservar su diversidad, ampliar su presencia en los paisajes y promover formas responsables de manejo y aprovechamiento. Ese propósito puede resumirse en una idea que acompañó todo el proceso de elaboración: **transformar datos en información, información en conocimiento y conocimiento en bases para tomar decisiones**.

Conservar el nogal andino significa reconocer su historia, comprender su ecología, valorar sus múltiples usos y asumir la responsabilidad de proyectarlo hacia el futuro.

Los autores

Agradecimeinto

Los autores expresan su sincero agradecimiento a las personas e instituciones que, desde diferentes ámbitos, contribuyeron a la preparación y consolidación de esta obra.

De manera especial, agradecemos a los revisores externos **Héctor Flores Zúñiga**, ingeniero agrónomo y MBA de la Universidad de Santiago de Chile, e **Iván Andrés Delgado Vargas**, ingeniero agroforestal, magíster en Agroforestería Tropical y candidato a doctor en Ciencias Agrarias de la Universidad de Nariño, Colombia. Sus observaciones, recomendaciones y criterios académicos permitieron fortalecer el rigor científico, la coherencia y la calidad del manuscrito.

Nuestro reconocimiento a **Glenn Galloway**, PhD, director del programa *Master of Sustainable Development Practice* de la Universidad de Florida, Estados Unidos, por el tiempo y la dedicación destinados a la revisión de los capítulos 12 y 13. Su amplia experiencia en el manejo de los recursos forestales y el desarrollo sostenible en América Latina enriqueció sustancialmente estos capítulos. Agradecemos, además, su disposición para mantener reuniones virtuales con los autores, analizar aspectos técnicos y compartir reflexiones que trascendieron la revisión formal del documento.

Expresamos nuestra especial gratitud a **David Jesús Ocaña Vidal**, maestro de la silvicultura andina en el Perú y el Ecuador. Sus enseñanzas y experiencias sobre la propagación y el manejo de *Juglans neotropica*, desarrolladas en el país durante décadas anteriores, proporcionaron referentes fundamentales para interpretar y evaluar el comportamiento actual de la especie. Su trayectoria representa un valioso vínculo entre las primeras experiencias silviculturales y los nuevos conocimientos científicos reunidos en esta obra.

Agradecemos profundamente a **Luis Fichamba**, quien, desde los conocimientos y la sabiduría del pueblo kichwa, contribuyó a comprender el significado, los usos tradicionales y la relación histórica del nogal con las comunidades de los Andes ecuatorianos. Los años compartidos en proyectos de extensión forestal participativa permitieron construir aprendizajes que hoy forman parte de la perspectiva intercultural y territorial del libro.

Nuestro reconocimiento a los ingenieros forestales **Luis Granda** y **Augusto Pinzón**, quienes recorrieron durante quince días distintos sectores de la provincia de Loja para actualizar la información sobre la especie. Su trabajo permitió georreferenciar sitios con presencia de nogal, obtener información dasométrica y documentar las condiciones ecológicas y de manejo en las que se encuentran árboles y poblaciones de *J. neotropica*. Su experiencia de campo, conocimiento del territorio y compromiso profesional aportaron información reciente y valiosa para esta publicación.

Expresamos también nuestro agradecimiento a la ingeniera forestal **Larissa Villota**, quien durante su formación en Ingeniería Forestal se vinculó al Programa de Investigación *Juglans* mediante prácticas desarrolladas en la asignatura de Silvicultura. Posteriormente, elaboró la tesis de grado titulada *Análisis de las propiedades físicas, anatómicas y de trabajabilidad de la madera de Juglans neotropica Diels. Carchi, Ecuador*, cuyos resultados dieron lugar a la publicación de un artículo científico sobre las propiedades tecnológicas de esta madera. Agradecemos, asimismo, su autorización para reproducir en este libro fotografías de su autoría.

Este reconocimiento se extiende a los padres de Larissa Villota, quienes acompañaron al equipo del Programa de Investigación *Juglans* durante el trabajo de campo efectuado en la provincia del Carchi. Su conocimiento del territorio facilitó la localización de árboles y sistemas con presencia de nogal, el contacto con los propietarios de los predios y la recopilación de información georreferenciada, datos dasométricos y testimonios relacionados con la edad, los usos y las experiencias locales en torno a la especie.

A las autoridades de la **Universidad Técnica del Norte**, nuestro especial agradecimiento por el respaldo institucional brindado al Programa de Investigación *Juglans* y a las iniciativas académicas, científicas y de vinculación que hicieron posible esta obra. Su apoyo permitió articular proyectos de investigación, trabajos de titulación, actividades docentes, estudios de campo e intercambios con especialistas e instituciones. Este libro constituye también un resultado del compromiso de la Universidad con la generación de conocimiento, la formación de profesionales y la búsqueda de respuestas frente a los desafíos ambientales y productivos del país.

A la **Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales** y a la **Carrera de Ingeniería Forestal**, agradecemos por haber proporcionado el espacio académico e institucional necesario para desarrollar, durante varios años, una línea de trabajo dedicada al conocimiento, la conservación y el manejo sostenible del nogal andino.

Agradecemos igualmente a los docentes y estudiantes de la Carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Técnica del Norte que participaron en el diseño, la implementación y la evaluación de los diferentes proyectos de investigación y vinculación relacionados con *J. neotropica*, desarrollados principalmente en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha y Napo.

Finalmente, expresamos nuestro reconocimiento a los investigadores, docentes, estudiantes, técnicos, productores, artesanos, comunidades y propietarios de los predios que facilitaron el acceso a los sitios de estudio, compartieron sus experiencias y colaboraron en las distintas etapas del proceso. Cada medición, observación, ensayo, fotografía, testimonio y conocimiento compartido contribuyó a la construcción de esta obra.

A todos ellos, nuestra gratitud por acompañar este esfuerzo orientado a conocer, valorar, conservar y proyectar al nogal andino como parte del patrimonio natural y cultural del Ecuador.

Los autores

CAPÍTULO 1

Introducción

Capítulo

1

Introducción

Árbol adulto de *Juglans neotropica* asociado con pasto chilena (*Megathyrsus maximus*) en la finca de Hugo Ramón, Valladolid, Zamora Chinchipe, Ecuador. Fotografía: Luis Granda.

De acuerdo con las bases taxonómicas internacionales Plants of the World Online (POWO, 2024) y World Flora Online (WFO, 2026), la familia Juglandaceae está representada en el Ecuador por un único género, *Juglans*, cuya única especie nativa reconocida es *Juglans neotropica* Diels. En esta obra, la denominación «nogal andino» se emplea para destacar su identidad biogeográfica como especie nativa de los Andes tropicales; en Ecuador también se la conoce comúnmente como nogal y, en algunas localidades, como tocte. Se trata de una especie forestal nativa de alto valor estratégico, cuyo significado trasciende la dimensión biológica para proyectarse en los ámbitos cultural, económico, ecológico y social del país. A lo largo de la historia, el nogal andino ha acompañado diversos procesos productivos, identitarios y territoriales, y en la actualidad se perfila como una especie clave para el manejo forestal sostenible, la restauración de paisajes degradados y el fortalecimiento de las economías locales.

J. neotropica se caracteriza por su condición de **especie de uso múltiple**. Además de producir una madera de alta calidad y elevada demanda, genera diversos productos forestales no madereros y provee servicios ecosistémicos fundamentales. Su aprovechamiento tradicional y contemporáneo refleja una baja huella ecológica (Cachimuel Muñoz, 2024; FAO, 2017; Lal, 2004; Molina Quilca, 2024; Tapia Quilambaqui, 2025), posee un elevado valor económico y comercial (Eraso Terán et al., 2026) y una amplia importancia sociocultural (Bravo & Tabango, 2023), particularmente visible en la región norte andina del Ecuador. En la provincia de Imbabura, por ejemplo, su madera ha sido utilizada desde finales del siglo XIX en la elaboración de artesanías finas y mobiliario tradicional; sus frutos forman parte de la gastronomía local, mientras que sus hojas, cáscaras y corteza han sido empleadas históricamente como fuentes naturales de tintes para fibras y textiles artesanales. Esta multifuncionalidad consolida al nogal andino como una especie emblemática del patrimonio natural y cultural ecuatoriano.

El contexto en el que crece y se desarrolla *J. neotropica* está determinado por la extraordinaria diversidad geográfica y ecológica del Ecuador continental. La cordillera de los Andes estructura el territorio en tres grandes regiones naturales (Costa, Sierra y Amazonía), mientras que la ubicación ecuatorial del país y la influencia de las corrientes oceánicas de Humboldt y El Niño generan marcados contrastes climáticos. A ello se añade un gradiente altitudinal que se extiende desde el nivel del mar hasta los 6 263 m s. n. m. En conjunto, estos factores originan un mosaico de condiciones ambientales altamente heterogéneas. Esta complejidad se ve reforzada por la diversidad de suelos, ecosistemas y contextos culturales, lo que dificulta la homogeneización de los procesos ecológicos y productivos a escala nacional.

Esta complejidad ambiental tiene implicaciones directas en el comportamiento de las especies forestales nativas. En el caso de *J. neotropica*, su desempeño genético, fenológico, ecológico, silvicultural y económico presenta variaciones significativas entre regiones, gradientes altitudinales y tipos de ecosistemas, como los bosques secos tropicales, los bosques montanos y los paisajes agroforestales andinos. Por esta razón, el eje central de esta obra se fundamenta en el **análisis comparativo**, entendido como una herramienta indispensable para interpretar la diversidad de respuestas de la especie frente a contextos ambientales y de manejo contrastantes. En un país con estas características, la formulación de recetas únicas resulta inviable; en su lugar, se requiere una aproximación contextualizada, territorial y diferenciada.

El presente libro se circunscribe exclusivamente al territorio ecuatoriano y se fundamenta en información técnico-científica generada principalmente a nivel nacional, complementada con referentes internacionales. La obra es el resultado de un esfuerzo académico sostenido en el que destacan los programas y proyectos de investigación desarrollados por tres instituciones públicas: la **Universidad Técnica del Norte (UTN)**, la **Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)** y la **Universidad Nacional de Loja (UNL)**. Estas universidades han liderado procesos de investigación orientados a la domesticación, el mejoramiento genético, el manejo silvicultural, el aprovechamiento sostenible y la restauración ecológica con *J. neotropica*, constituyéndose en los principales núcleos de generación de conocimiento científico sobre la especie en el país.

Desde una perspectiva epistemológica, esta publicación integra cuatro grandes esferas del conocimiento: **la conceptual, la metodológica, la información–conocimiento y el contexto**. La base conceptual sustenta los enfoques teóricos y técnicos abordados a lo largo del libro; la dimensión metodológica recoge los procesos seguidos para la obtención, validación y análisis de la información; la esfera información–conocimiento articula el saber científico producido por la academia con el conocimiento ancestral de comunidades indígenas y campesinas; y el contexto proporciona una lectura analítica de la complejidad territorial mediante escalas jerárquicas que van desde lo nacional hasta lo local.

Justificación de la obra

A pesar de los importantes avances alcanzados durante las últimas décadas, el conocimiento científico sobre *J. neotropica* en el Ecuador permanece disperso en artículos científicos, tesis, informes técnicos y literatura institucional, sin una obra de referencia que integre de manera sistemática los aspectos ecológicos, silviculturales, genéticos, económicos, culturales y de manejo de la especie. Esta fragmentación ha limitado la transferencia del conocimiento hacia la investigación, la formación profesional, la gestión forestal y la formulación de políticas públicas. En este contexto, la presente obra busca cubrir ese vacío mediante la integración crítica de la evidencia científica disponible y la incorporación de resultados inéditos generados en el país.

En consecuencia, la pregunta que orienta esta obra es:

¿Cómo integrar el conocimiento científico, técnico y tradicional disponible para fortalecer la conservación, el manejo sostenible y el aprovechamiento de *J. neotropica* en el Ecuador?

Enfoque científico de la obra

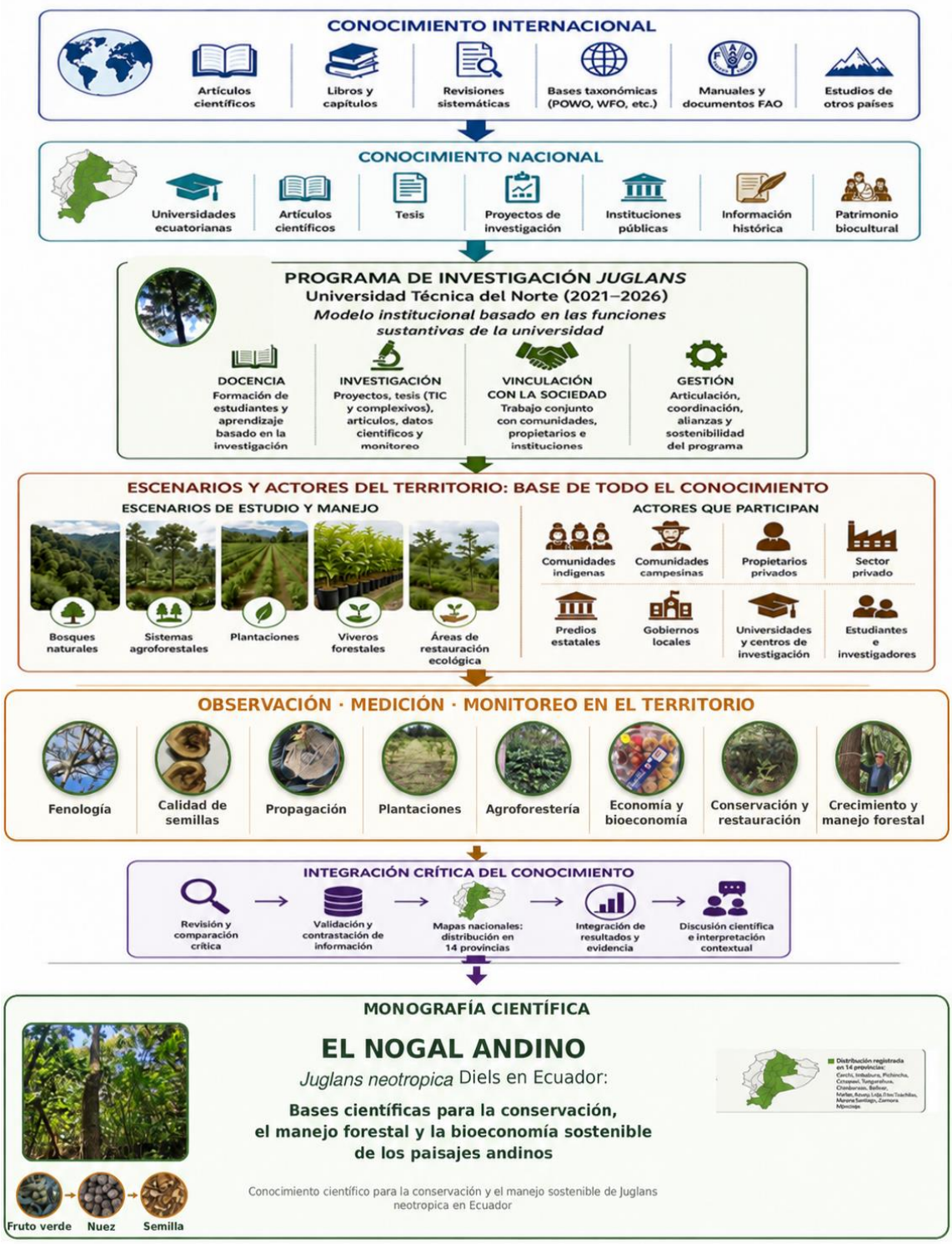
Más que una compilación de información científica, esta obra constituye una integración crítica del conocimiento generado sobre *J. neotropica* en el Ecuador. Para ello adopta un enfoque sustentado en la ciencia de la complejidad, el pensamiento sistémico, la teoría del cambio y el manejo adaptativo. Bajo esta perspectiva, *J. neotropica* no se analiza como una especie aislada, sino como un componente de sistemas socioecológicos dinámicos, donde interactúan procesos ecológicos, económicos, culturales e institucionales que evolucionan en diferentes escalas espaciales y temporales. Este

enfoque reconoce que las respuestas del nogal andino frente al cambio climático, las intervenciones silviculturales, la restauración ecológica y las decisiones de manejo dependen de múltiples factores interrelacionados, lo que exige estrategias de gestión flexibles, aprendizaje continuo y procesos permanentes de retroalimentación entre la investigación científica, la experiencia de los productores y la formulación de políticas públicas.

La construcción de esta monografía respondió a un proceso de integración progresiva de conocimiento generado en diferentes escalas espaciales, temporales e institucionales. Un componente central de este proceso fue el **Programa de Investigación *Juglans***, formulado en 2021 en la Carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Técnica del Norte con el propósito de articular investigación, docencia, vinculación y gestión alrededor de la conservación, el conocimiento científico y el desarrollo socioeconómico de *J. neotropica* (Añazco Romero, 2021). El Programa fue aprobado institucionalmente por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales en enero de 2022, mediante Resolución No. 05 SO-02-HCD-2022-FICAYA-UTN (Universidad Técnica del Norte [UTN], 2022). Su ejecución durante el período 2021–2026 permitió articular escenarios de investigación y manejo, actores del territorio y proyectos desarrollados en diferentes ámbitos temáticos y geográficos. Los resultados generados en este marco se integran en la presente obra con información científica nacional e internacional. La arquitectura general que sustenta este proceso de generación, integración y síntesis del conocimiento se presenta en la Figura 1.1.

Figura 1.1

Arquitectura para la generación e integración del conocimiento que sustenta la presente monografía científica



Nota. La presente monografía integra conocimiento generado en diferentes escalas espaciales e institucionales mediante la articulación de escenarios de investigación y manejo, actores del territorio, resultados del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) y evidencia científica nacional e internacional, con el propósito de construir una visión integradora sobre *Juglans neotropica* en Ecuador.

Aportes de la obra

En este contexto, el presente libro no solo sintetiza el conocimiento científico disponible sobre *J. neotropica***,** sino que incorpora resultados inéditos obtenidos durante varios años de investigación desarrollada en diferentes regiones del Ecuador. Entre sus principales aportes destacan la integración del conocimiento ecológico, silvicultural, económico y sociocultural de la especie; la caracterización de sus relaciones alométricas; el desarrollo del primer índice de sitio para *J. neotropica* en el Ecuador; la sistematización de información sobre genética, propagación, manejo forestal y sistemas agroforestales; y la propuesta de herramientas técnicas para orientar la restauración, el manejo adaptativo y el aprovechamiento sostenible de la especie. Asimismo, la obra articula evidencia científica, conocimiento ancestral y experiencias de campo bajo un enfoque interdisciplinario, proporcionando una base sólida para apoyar la investigación, la toma de decisiones y el diseño de políticas públicas orientadas a la conservación y al uso sostenible del nogal andino.

La obra se estructura en **catorce capítulos**. Este capítulo introductorio establece el marco general y el enfoque conceptual del libro. Los capítulos subsiguientes desarrollan de forma progresiva y articulada los siguientes temas: el estado del arte y análisis bibliográfico, los aspectos históricos y culturales, botánicos y filogenéticos, la distribución geográfica y ecológica, la fenología, las semillas, la propagación, las plantaciones, los sistemas agroforestales, los productos y servicios ecosistémicos, el manejo y aprovechamiento, y finalmente el análisis económico, la cadena de valor, la economía circular, la bioeconomía y las soluciones basadas en la naturaleza.

Desde una perspectiva histórica y cultural, resulta igualmente relevante reconocer el papel de diversos pueblos indígenas originarios en la conservación y transmisión de conocimientos ancestrales asociados a *J. neotropica*. Entre ellos destacan el pueblo Saraguro en el sur del país (provincia de Loja), el pueblo Salasaka en la región central (provincia de Tungurahua) y los pueblos Karanki y Kayambi en el norte (provincias de Imbabura y Pichincha). A pesar de los procesos históricos de dominación derivados de la expansión incaica y, posteriormente, de la colonización española, estas comunidades han mantenido y revitalizado saberes tradicionales vinculados al uso y manejo del nogal. En las últimas décadas, dichos conocimientos han sido recuperados y difundidos mediante iniciativas comunitarias y publicaciones, lo que contribuye a reforzar la dimensión histórica, cultural y patrimonial de esta especie en Ecuador.

En conjunto, esta publicación se propone consolidarse como una obra de referencia sobre *J. neotropica* en el Ecuador, integrando por primera vez en un solo volumen la evidencia científica disponible, el conocimiento tradicional, las experiencias de manejo y nuevos desarrollos metodológicos generados en el país. Se espera que constituya una herramienta de consulta para investigadores, estudiantes, docentes, técnicos, productores, tomadores de decisión y demás actores comprometidos con la conservación, la restauración y el manejo sostenible de los bosques andinos.

En consecuencia, el libro se construye desde una visión transdisciplinaria que integra la ecología forestal, la silvicultura, la genética, la restauración ecológica, la bioeconomía, las ciencias sociales y la gestión territorial, considerando al nogal andino como un elemento articulador de paisajes, medios de vida y procesos de desarrollo sostenible.

CAPÍTULO 2

Estado del arte y construcción del conocimiento sobre *Juglans neotropica*

Capítulo

2

Estado del arte y construcción del conocimiento sobre *Juglans neotropica*

Registro de variables dasométricas de un árbol adulto de *J. neotropica* en el bosque natural El Tundo, Loja, Ecuador. Fotografía: Augusto Pinzón.

El conocimiento científico y técnico sobre *Juglans neotropica* se ha construido progresivamente a partir de fuentes de distinta naturaleza, entre ellas artículos científicos, tesis universitarias, libros, manuales, informes técnicos y documentos institucionales. Esta diversidad documental refleja el carácter multidisciplinario del estudio de la especie, que comprende aspectos botánicos, ecológicos, genéticos y silviculturales, así como dimensiones productivas, económicas, culturales y de conservación.

La producción de conocimiento sobre *J. neotropica* presenta una marcada heterogeneidad temporal e institucional. Los primeros antecedentes disponibles son relativamente dispersos, mientras que durante las últimas décadas se observa una expansión de las investigaciones, particularmente desde universidades y grupos académicos de la región andina. En este proceso, las tesis han desempeñado un papel relevante como fuentes de información primaria y como espacios de formación de investigadores, y parte de sus resultados ha dado posteriormente origen a publicaciones científicas.

En este contexto, el capítulo presenta un análisis bibliográfico descriptivo de un corpus final de **405 referencias** utilizadas como fundamento de esta obra. El análisis considera la evolución temporal de la producción documental, los tipos de fuentes, su relación temática con *J. neotropica*, la procedencia académica e institucional, la participación de las universidades y la transferencia de resultados desde los trabajos de titulación hacia las publicaciones científicas.

El propósito no es desarrollar una bibliometría en sentido estricto, sino examinar cómo se ha configurado y evolucionado la base de conocimiento disponible sobre la especie. Desde esta perspectiva, el estado del arte trasciende el inventario de publicaciones y permite reconocer la contribución de diferentes fuentes y actores, la consolidación progresiva de núcleos de investigación y los campos en los que la evidencia continúa siendo limitada o fragmentaria.

2.1. Metodología del análisis bibliográfico

El análisis bibliográfico se realizó a partir de las fuentes documentales recopiladas durante la elaboración de esta obra sobre *J. neotropica*. La búsqueda y recuperación de información se desarrollaron progresivamente mediante la consulta de literatura científica, repositorios universitarios, libros, documentos técnicos, fuentes institucionales y otros materiales pertinentes para los componentes temáticos abordados. Debido al carácter multidisciplinario de la obra, la recopilación no se restringió a documentos dedicados exclusivamente a *J. neotropica*, sino que incorporó también estudios multiespecíficos, investigaciones sobre otras especies del género *Juglans* y literatura conceptual, metodológica, histórica, cultural, económica, política y normativa necesaria para interpretar integralmente la especie.

La compilación inicial alcanzó **456 registros bibliográficos**. Estos fueron sometidos a un proceso de revisión y depuración para conformar la base documental utilizada en la obra. Se excluyeron los registros que presentaron: **(1) duplicación sustancial de contenido**, como ocurrió cuando los resultados de una tesis fueron publicados posteriormente en un artículo sin modificaciones o aportes relevantes; **(2) información cuya procedencia o veracidad no pudo ser comprobada; (3) contenidos**

sustituidos por versiones posteriores de la misma fuente o por información equivalente más actualizada; y (4) escasa relación con el contexto biológico, ecológico, forestal, productivo, cultural o socioeconómico de *J. neotropica*.

Cuando una tesis y un artículo presentaron contenidos sustancialmente equivalentes, se conservó en el corpus final la versión que ofrecía mayor respaldo científico, actualización o utilidad para los objetivos de la obra, evitando contabilizar dos veces la misma contribución. No obstante, la correspondencia entre ambos documentos se mantuvo registrada para analizar la transferencia de resultados desde los trabajos de titulación hacia las publicaciones científicas. Como resultado del proceso de depuración, se obtuvo un corpus definitivo de **405 referencias**, equivalente al **88,8 %** del conjunto inicialmente recopilado; los 51 registros excluidos representaron el **11,2 %**.

Según su naturaleza documental, las 405 referencias fueron clasificadas en tres grupos: **(1) artículos científicos; (2) tesis y trabajos de titulación, considerados literatura gris; y (3) libros, manuales, informes, documentos técnicos y otras fuentes**. El corpus final estuvo constituido por **137 artículos científicos, 115 tesis y trabajos de titulación, y 153 documentos pertenecientes al tercer grupo**. Esta clasificación permitió comparar la contribución de la literatura científica periódica, la producción académica universitaria y la documentación técnica, institucional y conceptual utilizada en la obra.

De manera complementaria, cada referencia fue clasificada según su relación temática con la especie en tres categorías: **(1) documentos dedicados exclusivamente a *J. neotropica*; (2) documentos que incluyeron a *J. neotropica* conjuntamente con otras especies; y (3) fuentes utilizadas como soporte conceptual, metodológico, histórico, cultural, económico, político o normativo**. De las 405 referencias, 158 correspondieron a la primera categoría, 91 a la segunda y 156 a la tercera, equivalentes al **39,0 %, 22,5 % y 38,5 %**, respectivamente. Esta clasificación permitió distinguir la evidencia directamente relacionada con la especie de las fuentes empleadas para contextualizar e interpretar sus diferentes dimensiones de estudio.

La evolución temporal del corpus se examinó agrupando las referencias por periodos cronológicos. Además de las frecuencias absolutas, se calculó una **tasa anualizada**, expresada como número de documentos por año, para reducir el efecto de la diferente duración de los intervalos. La tasa se obtuvo dividiendo el número de documentos registrado en cada periodo entre el número de años que lo integran. Los resultados correspondientes a 2020–2026 se interpretaron considerando que este intervalo comprende siete años y que la recopilación incluye documentos registrados hasta agosto de 2026.

Las tesis y los trabajos de titulación fueron objeto de un análisis específico debido a su importancia dentro del corpus. Se clasificaron según nivel académico, institución de procedencia y país, y se examinó su concentración en las universidades con mayor producción relacionada con *J. neotropica*. Asimismo, se identificaron los trabajos de pregrado que dieron origen a artículos científicos. Esta relación se estableció cuando la coincidencia de autoría, objeto de estudio, material o sitio analizado y resultados permitió reconocer que la publicación científica procedía del trabajo de titulación correspondiente.

Los resultados fueron examinados mediante estadística descriptiva, utilizando frecuencias absolutas, porcentajes y tasas anualizadas. El análisis se orientó a reconocer la evolución temporal y la composición del corpus, el grado de relación de las fuentes con la especie, la participación de las universidades, la transferencia de resultados desde los trabajos de titulación hacia publicaciones científicas y la consolidación de núcleos de investigación. En consecuencia, el procedimiento corresponde a un **análisis bibliográfico descriptivo del corpus utilizado en la elaboración de la obra**, y no a un estudio bibliométrico basado en indicadores de citación, redes de coautoría, índices de impacto o análisis de coocurrencia.

2.2. Evolución temporal de la producción bibliográfica

La producción bibliográfica relacionada directa o indirectamente con *J. neotropica* presenta una marcada transformación temporal. Los antecedentes correspondientes a las primeras décadas analizadas son escasos y discontinuos, mientras que desde finales del siglo XX se observa una expansión progresiva del número y la diversidad de fuentes utilizadas para estudiar la especie. Este crecimiento se intensificó desde 2010 y alcanzó su mayor expresión durante 2020–2026, periodo que concentra una proporción importante de los documentos incluidos en el corpus.

Para comparar periodos de diferente duración, además de las frecuencias absolutas se calcularon tasas anualizadas por tipo documental. Este procedimiento resulta especialmente importante para interpretar el intervalo 2020–2026, debido a que la recopilación comprende únicamente las publicaciones registradas hasta agosto de 2026. Las tasas obtenidas se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1

Tasas anualizadas de las fuentes bibliográficas utilizadas en el análisis de Juglans neotropica, según tipo documental y periodo de publicación

Período	Artículos científicos (art./año)	Tesis y trabajos de titulación (tesis/año)	Libros y documentos técnicos (doc./año)
1960-1969	0,2	0,0	0,4
1970-1979	0,1	0,0	0,5
1980-1989	0,1	0,1	0,7
1990-1999	1,1	0,1	2,4
2000-2009	2,7	0,5	2,9
2010-2019	3,3	3,7	5,3
2020-2026	9,3	10,7	4,7

Nota. La tasa anualizada se calculó dividiendo el número de documentos registrado en cada periodo entre el tiempo comprendido en el intervalo correspondiente. Se excluyeron las referencias anteriores a 1960 y aquellas sin fecha de publicación, debido a que no permitían establecer periodos cronológicos comparables. Para 2020–2026 se consideró el tiempo transcurrido desde enero de 2020 hasta agosto de 2026, equivalente aproximadamente a 6,67 años.

La producción de artículos científicos permaneció reducida durante las tres primeras décadas analizadas, con tasas comprendidas entre 0,1 y 0,2 artículos por año. A partir de 1990 se observa un crecimiento más definido: la tasa aumentó de **1,1 artículos/año en 1990–1999** a **2,7 en 2000–2009** y **3,3 en 2010–2019**. Durante 2020–2026 alcanzó **9,3 artículos/año**, lo que evidencia una aceleración considerable de la comunicación científica relacionada con la especie y con los campos de conocimiento utilizados para su estudio.

La evolución de las tesis y los trabajos de titulación muestra una transformación todavía más pronunciada. Esta categoría fue prácticamente inexistente durante los periodos iniciales y permaneció reducida hasta finales del siglo XX. La tasa pasó de **0,5 tesis/año en 2000–2009** a **3,7 en 2010–2019** y alcanzó aproximadamente **10,7 tesis/año en 2020–2026**. Este comportamiento evidencia el creciente peso de la investigación universitaria en la generación reciente de conocimiento sobre *J. neotropica* y constituye uno de los rasgos más distintivos de la estructura documental contemporánea.

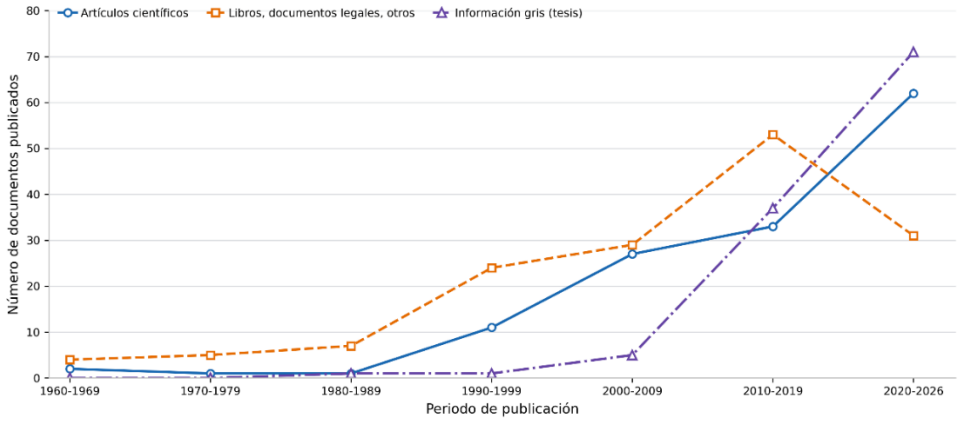
Los libros, manuales, informes, documentos técnicos y otras fuentes presentan una trayectoria diferente. Su tasa aumentó de **2,4 documentos/año en 1990–1999** a **2,9 en 2000–2009** y alcanzó **5,3 en 2010–2019**. Durante 2020–2026 descendió ligeramente hasta aproximadamente **4,7 documentos/año**. A diferencia de los artículos y las tesis, esta categoría no registra su valor máximo en el periodo más reciente, lo que sugiere un cambio en la composición de la base documental: el crecimiento contemporáneo está siendo impulsado principalmente por la producción académica y científica.

En conjunto, la comparación entre periodos muestra que la tasa de artículos científicos aumentó de **1,1 a 9,2 artículos/año** entre 1990–1999 y 2020–2026, mientras que la correspondiente a las tesis pasó de **0,1 a 10,7 tesis/año**. Más que un simple incremento del número de referencias, estos resultados evidencian una modificación en los mecanismos mediante los cuales se genera y comunica el conocimiento: la producción reciente presenta un componente universitario y científico considerablemente mayor que el observado durante las etapas precedentes.

Las tasas anualizadas permiten comparar la intensidad de producción entre periodos, mientras que las frecuencias absolutas muestran la magnitud y trayectoria de cada componente documental. La Figura 2.1 representa esta evolución y permite observar el crecimiento reciente de los artículos científicos y las tesis, así como la trayectoria diferenciada de los libros, documentos técnicos y otras fuentes.

Figura 2.1

Evolución temporal de las fuentes bibliográficas utilizadas en el análisis de Juglans neotropica, según tipo documental



Nota. Las líneas representan el número absoluto de documentos registrado en cada periodo. El intervalo 2020–2026 comprende las referencias recopiladas hasta agosto de 2026; por esta razón, la comparación de la intensidad de producción entre periodos debe complementarse con las tasas anualizadas presentadas en la Tabla 2.1.

El crecimiento del corpus no debe interpretarse, por sí mismo, como evidencia de una expansión equivalente del conocimiento específico sobre *J. neotropica*. La base documental incluye estudios dedicados exclusivamente a la especie, investigaciones multiespecíficas y fuentes conceptuales, metodológicas o contextuales utilizadas para sustentar su análisis. En consecuencia, la evolución temporal representa la disponibilidad de literatura pertinente para la construcción del conocimiento sobre el nogal andino y no exclusivamente el número de investigaciones cuyo único objeto de estudio fue la especie. Esta distinción evita sobreestimar el grado de especialización de la producción reciente.

Aun considerando esta precaución, la trayectoria observada evidencia una transición desde una base documental inicialmente dispersa hacia un escenario de mayor producción y diversificación de fuentes. La aceleración registrada desde 2010 coincide con la creciente participación de universidades y grupos de investigación que han desarrollado trabajos de titulación, proyectos y publicaciones científicas sobre distintas dimensiones de *J. neotropica*. Sin embargo, la reducida producción registrada durante las décadas iniciales no significa que anteriormente no existieran actividades o conocimientos sobre la especie. Para comprender el origen de la investigación contemporánea es necesario examinar también las experiencias de extensión, experimentación práctica, manejo productivo y conservación desarrolladas antes de la consolidación de los actuales núcleos académicos.

2.3. Génesis de la investigación sobre *J. neotropica* en Ecuador: de la práctica forestal a la investigación científica

La reducida producción documental registrada durante las primeras décadas analizadas no implica ausencia de interés o de actividades relacionadas con *J. neotropica*.

Los antecedentes de la investigación contemporánea sobre la especie se encuentran tanto en las primeras contribuciones botánicas y forestales como, posteriormente, en experiencias de extensión, experimentación de campo y manejo de sistemas productivos.

Un antecedente temprano se encuentra en la obra de Misael Acosta-Solís, uno de los pioneros de la botánica y las ciencias forestales en Ecuador. En *Los bosques del Ecuador y sus productos*, el autor integró el conocimiento de la flora forestal ecuatoriana con sus posibilidades de aprovechamiento, organizando diferentes especies y productos según su importancia y usos. En este contexto incluyó al nogal (*J. neotropica*), destacando el valor de su madera y otros aprovechamientos asociados con la especie (Acosta-Solís, 1961). Este registro evidencia que el nogal formaba parte del conocimiento botánico-forestal documentado en Ecuador varias décadas antes de la consolidación de los programas de extensión y de la investigación experimental desarrollada posteriormente.

Entre la década de 1980 y comienzos de la década de 2000 se desarrollaron en los Andes ecuatorianos diferentes iniciativas orientadas al manejo sostenible de tierras campesinas e indígenas. Entre ellas destacó el Proyecto Manejo y Uso Sostenible de Tierras Andinas (PROMUSTA), que articuló experiencias de manejo sostenible de tierras y prácticas agroforestales y silvopastoriles en comunidades de la Sierra ecuatoriana (CARE Ecuador, 1991). Posteriormente, el proyecto Desarrollo Forestal Campesino (DFC), ejecutado entre 1993 y 1998, tuvo continuidad durante una segunda fase de cinco años mediante el proyecto Apoyo al desarrollo forestal comunal en los Andes del Ecuador, fortaleciendo la participación de las comunidades y de las instituciones locales en el manejo de los recursos forestales (FAO, 2004). Paralelamente, la Red Agro-Forestal Ecuatoriana (RAFE) promovió el intercambio, la sistematización y la difusión de experiencias agroforestales desarrolladas en el país (Red Agro-Forestal Ecuatoriana [RAFE], 1993).

Un ejemplo de este proceso de generación y sistematización de conocimiento se encuentra en los Huertos Agroforestales Familiares (HAF) promovidos por el Proyecto Desarrollo Forestal Campesino. Las experiencias desarrolladas con familias campesinas fueron posteriormente sistematizadas en cartillas técnicas que documentaron la composición, el manejo y los aprendizajes derivados de estos sistemas productivos. En las experiencias sistematizadas, *J. neotropica* aparece como uno de los componentes arbóreos de los HAF, evidenciando su incorporación en prácticas agroforestales desarrolladas bajo condiciones reales de producción familiar (DFC, 2000).

Estas iniciativas promovieron la incorporación del componente arbóreo en sistemas productivos dependientes de la agricultura y la ganadería, con especial atención a especies forestales nativas. Frente a la limitada información técnica disponible, parte de las respuestas a los problemas encontrados durante su implementación se generó mediante ensayos de campo y metodologías participativas sustentadas en la observación, el aprendizaje mediante la práctica y la adaptación progresiva de las técnicas a las condiciones locales. La sistematización de estas experiencias permitió, además, organizar y transferir los aprendizajes generados en los propios sistemas productivos. De esta manera, la experimentación aplicada y el conocimiento construido en campo antecedieron o coexistieron con la investigación académica que posteriormente abordaría estos problemas mediante diseños experimentales más estructurados.

Un antecedente particularmente significativo surgió en Loja durante la década de 1980, asociado con los problemas sanitarios encontrados en plantaciones jóvenes de nogal. El trabajo de entomología forestal desarrollado en Ecuador permitió reconocer un barrenador que afectaba los brotes terminales de *J. neotropica*. A partir de ejemplares obtenidos de brotes recolectados cerca de Loja, Miller (1987) describió científicamente una nueva especie, *Gretchena garai*, y documentó ataques reiterados en plantaciones de uno a cuatro años de edad. El daño ocasionado en los brotes terminales provocaba la pérdida de la dominancia apical y favorecía la formación de múltiples ejes líderes, comprometiendo el desarrollo de un fuste único y recto y, consecuentemente, su calidad para el aprovechamiento maderero. Miller denominó *G. garai* a la nueva especie en reconocimiento al trabajo de entomología forestal desarrollado en Ecuador por Robert I. Gara, quien además proporcionó información y especímenes utilizados en el estudio.

En ese mismo contexto, Sarango (1987) desarrolló en la Universidad Nacional de Loja una investigación sobre la taxonomía, bioecología y distribución del barrenador del nogal en la provincia de Loja. La coincidencia temporal y temática de ambos trabajos resulta particularmente ilustrativa: uno de los problemas encontrados durante el establecimiento de *J. neotropica* se convirtió tempranamente en objeto de investigación entomológica y académica. Así, algunas de las primeras investigaciones formales identificadas en el corpus no surgieron únicamente del interés por describir la especie, sino también de la necesidad de resolver problemas concretos asociados con su producción y manejo.

La atención a la sanidad forestal del nogal se amplió posteriormente con la obra *Entomología forestal* de Gara & Onore (1989), desarrollada en el marco del Proyecto DINAF-AID. Esta publicación sistematizó información sobre insectos asociados con especies forestales en Ecuador e incluyó a *J. neotropica* entre las plantas hospederas de diferentes grupos de insectos. El antecedente resulta relevante porque muestra que, hacia finales de la década de 1980, el conocimiento entomológico relacionado con el nogal trascendía el estudio específico de *G. garai* y comenzaba a integrarse en una perspectiva más amplia de protección y sanidad forestal.

El interés técnico por el nogal tampoco se restringió a los ámbitos comunitario y universitario. Durante la década de 1990, el sector forestal-productivo mostró interés en reunir y transferir conocimientos que permitieran promover su establecimiento y manejo. Un antecedente representativo es el *Manual para la producción de nogal* (*Juglans neotropica* Diels) de Estrada (1997), publicado con participación de la Corporación de Desarrollo Forestal y Maderero del Ecuador (CORMADERA). Posteriormente, Ecuador Forestal (2010) publicó la *Ficha técnica No. 2: Nogal (Juglans neotropica)*. La existencia de documentos técnicos específicamente dedicados a la especie evidencia que las necesidades de información sobre propagación, producción y manejo trascendieron el ámbito académico y estuvieron presentes también entre actores vinculados con la actividad forestal.

De manera paralela, los proyectos de desarrollo forestal incorporaron una dimensión relacionada con la conservación y el manejo de poblaciones naturales. En el sur del Ecuador, el Proyecto Desarrollo Forestal Campesino mantuvo vínculos con comunidades y actores locales relacionados con el bosque natural de nogal de El Tundo, en el cantón Sozoranga, provincia de Loja. Esta experiencia fue sistematizada en 1998

mediante el documento *Hacia un manejo sostenido del bosque nativo de nogal: Un trabajo conjunto de la comunidad del Tundo, en la búsqueda de alternativas sustentables* (Desarrollo Forestal Campesino en los Andes del Ecuador, 1998). Este antecedente muestra que, mientras una vertiente de las experiencias buscaba resolver problemas asociados con el establecimiento y la producción, otra comenzaba a plantear interrogantes sobre la conservación y el manejo sostenible de poblaciones naturales de *J. neotropica*.

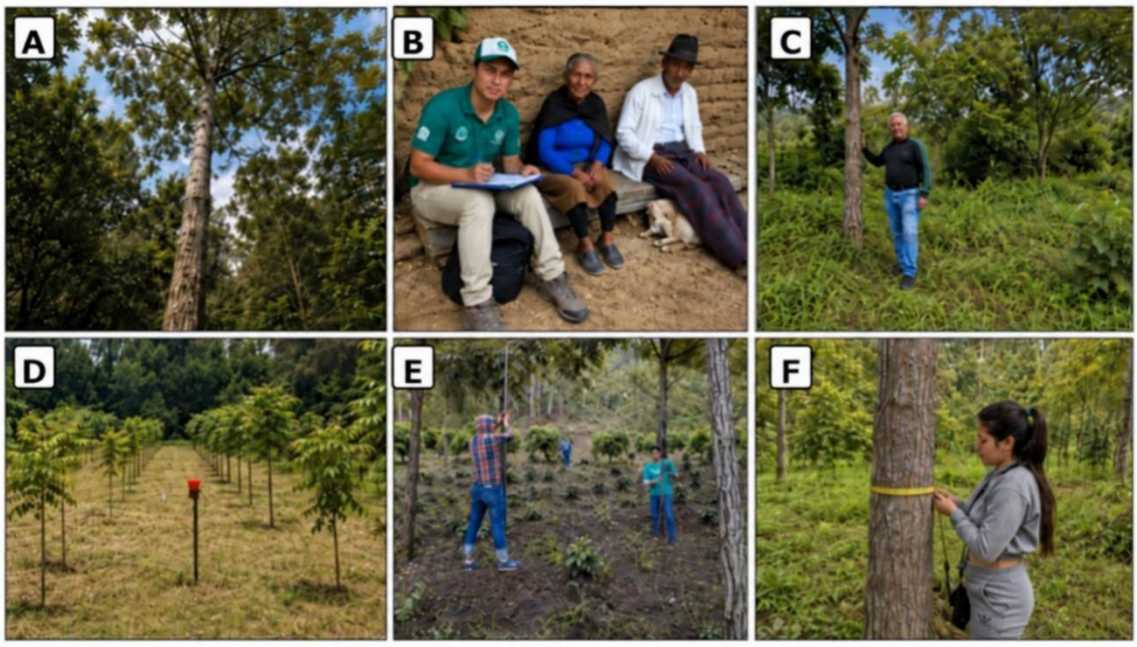
Algunas prácticas agroforestales desarrolladas durante esta etapa adquirieron posteriormente valor como escenarios de observación e investigación. Los linderos con nogal constituyen un ejemplo de esta continuidad entre práctica productiva y generación de conocimiento. Carlson & Añazco (1990) ya mencionaban a *J. neotropica* entre las especies utilizadas en linderos en la Sierra ecuatoriana y, posteriormente, Yaguache Ordóñez & Carrión Puglla (2004) documentaron esta práctica en Pimampiro, identificando al nogal entre las especies arbóreas empleadas y registrando específicamente linderos con la especie en la comunidad Los Árboles. Estos antecedentes muestran que parte del conocimiento sobre el comportamiento del nogal se generó también a partir de experiencias desarrolladas en sistemas productivos manejados por familias campesinas, fuera de los espacios experimentales universitarios.

En conjunto, estos antecedentes permiten interpretar la etapa inicial de la producción bibliográfica desde una perspectiva diferente. El reducido número de documentos de las décadas de 1980 y 1990 no representa una ausencia de interés por *J. neotropica*, sino una fase en la que coexistieron experimentación participativa, extensión forestal, interés productivo, conservación comunitaria y primeras investigaciones académicas y científicas. Los problemas encontrados durante la propagación, el establecimiento, la sanidad y el manejo de la especie contribuyeron a generar preguntas que posteriormente fueron retomadas y ampliadas por las universidades mediante trabajos de titulación, proyectos institucionales y publicaciones científicas.

Esta trayectoria ayuda a comprender la expansión documental observada posteriormente. La construcción del conocimiento sobre *J. neotropica* en Ecuador puede interpretarse como un proceso progresivo en el que la experiencia práctica, el conocimiento local, la extensión, la transferencia tecnológica y la investigación científica se han retroalimentado hasta dar lugar a líneas de investigación cada vez más estructuradas y especializadas. La diversidad de actores, ambientes y escenarios en los que se ha desarrollado este proceso se ilustra en la Figura 2.2.

Figura 2.2

Juglans neotropica y escenarios de construcción del conocimiento sobre la especie en Ecuador



Nota. **A)** Árbol adulto de *J. neotropica* en bosque natural de Alausí, Chimborazo; **B)** actividad de vinculación con la comunidad durante la caracterización de sistemas agroforestales en Cahuasquí, Urcuquí, Imbabura (Fuentes Rojas, 2016); **C)** Fabián Cerón, productor de San Francisco de Natabuela, Imbabura, junto a un árbol de *J. neotropica*, durante la recuperación de información sobre la historia y los usos locales de la especie; **D)** investigación de campo en la plantación experimiental de *J. neotropica* de Yuyucocha, Ibarra (Mediavilla, 2023); **E)** toma de muestras de árboles para estudios de almacenamiento de carbono (Hoyos, 2019); **F)** medición dasomética en Yuyucocha para la determinación del factor de forma y elaboración de tablas de volumen (López, 2023).

2.4. Estructura y especialización del corpus bibliográfico

El corpus final estuvo constituido por **405 referencias**, distribuidas en 137 artículos científicos, 115 tesis y trabajos de titulación, y 153 libros, manuales, informes y otros documentos. Estas categorías representan, respectivamente, el **33,8 %, 28,4 % y 37,8 %** del total. La distribución relativamente equilibrada entre los tres tipos documentales evidencia que la construcción del conocimiento utilizado en esta obra no depende exclusivamente de publicaciones científicas periódicas, sino de la integración de investigación arbitrada, producción académica universitaria y fuentes técnicas, conceptuales e institucionales.

La composición documental adquiere una interpretación diferente cuando se considera el grado de relación de cada fuente con *J. neotropica*. Del total analizado, 158 referencias (39,0 %) estuvieron dedicadas exclusivamente a la especie y 91 (22,5 %) la abordaron conjuntamente con otras especies. En conjunto, **249 documentos (61,5 % del**

corpus) contienen información directa sobre *J. neotropica*, ya sea como objeto exclusivo de estudio o como una de las especies evaluadas. Las 156 referencias restantes (38,5 %) corresponden a fuentes utilizadas para proporcionar fundamentos conceptuales, metodológicos, históricos, culturales, económicos, políticos o normativos requeridos para interpretar integralmente los diferentes componentes de la obra. La distribución de estas categorías según el tipo documental se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2

Distribución del corpus bibliográfico según tipo documental y relación temática con Juglans neotropica

Tipo de fuente	Exclusivo sobre *J. neotropica*	*J. neotropica* y otras especies	Fuentes de soporte y contexto	Total
Artículos científicos	53	20	64	137
Tesis y trabajos de titulación	90	23	2	115
Libros, manuales, informes y otros documentos	15	48	90	153
Total	**158**	**91**	**156**	**405**
Porcentaje del corpus	**39,0**	**22,5**	**38,5**	**100,0**

Nota. La categoría "Exclusivo sobre *J. neotropica*" comprende fuentes centradas específicamente en la especie; "*J. neotropica* y otras especies" incluye estudios multiespecíficos en los que el nogal forma parte del análisis; y "Fuentes de soporte y contexto" reúne referencias conceptuales, metodológicas, históricas, culturales, económicas, políticas o normativas utilizadas para sustentar la interpretación de los diferentes componentes de la obra.

La distribución presentada en la Tabla 2.2 evidencia diferencias importantes en el grado de especialización de los distintos tipos documentales. Entre los artículos científicos, **el 53,3 % aporta información directa sobre *J. neotropica***, ya sea como tema exclusivo o como parte de estudios multiespecíficos, mientras que el 46,7 % cumple principalmente una función de soporte conceptual, metodológico o contextual. Esta composición muestra que la literatura científica periódica proporciona tanto evidencia específica sobre la especie como conocimientos desarrollados en campos más amplios, necesarios para interpretar procesos ecológicos, silviculturales, genéticos, fisiológicos, productivos y socioeconómicos relacionados con el nogal andino.

El patrón es sustancialmente diferente en las tesis y los trabajos de titulación. En esta categoría, **el 98,3 % de las fuentes contiene información directamente relacionada con *J. neotropica*** y únicamente dos documentos fueron utilizados con fines contextuales o metodológicos. Además, el 78,3 % de las tesis estuvo dedicado exclusivamente a la especie. Estos resultados convierten a la literatura académica universitaria en el componente proporcionalmente más especializado del corpus y evidencian su importancia para recuperar el conocimiento empírico generado sobre el nogal andino.

Los libros, manuales, informes y otros documentos presentan una composición diferente. En este grupo, **el 41,2 % contiene información directa sobre *J. neotropica***, mientras que el 58,8 % proporciona principalmente fundamentos generales o contextuales. Esta estructura es coherente con la función de estas fuentes en una obra de carácter integrador, pues aportan marcos sobre silvicultura, ecología forestal, propagación, agroforestería, servicios ecosistémicos, economía, políticas públicas, legislación, historia y otros ámbitos necesarios para interpretar la evidencia específica disponible sobre la especie.

En conjunto, los resultados muestran una **complementariedad funcional entre los diferentes componentes del corpus**. Los artículos científicos proporcionan evidencia específica y fundamentos procedentes de campos de investigación relacionados; las tesis concentran una elevada proporción de información empírica generada directamente sobre *J. neotropica*; y los libros, informes y documentos técnicos aportan principalmente los marcos conceptuales e institucionales que permiten contextualizarla. Por tanto, la importancia de cada categoría no debe evaluarse únicamente por su participación porcentual en el corpus, sino también por la función que cumple en la construcción del conocimiento reunido en esta obra.

La elevada especialización de las tesis plantea, a su vez, una cuestión relevante para la disponibilidad y circulación del conocimiento sobre *J. neotropica*. Una proporción considerable de la evidencia directamente relacionada con la especie se encuentra originalmente en trabajos académicos cuya difusión suele limitarse a los repositorios institucionales. Parte de esta producción, sin embargo, ha trascendido posteriormente ese ámbito mediante su transformación en artículos científicos. La relación entre investigación formativa, publicación científica y consolidación de capacidades institucionales constituye un componente central de la evolución reciente del conocimiento sobre la especie y se examina en el apartado siguiente.

2.5. Producción académica y contribución de las universidades

La producción universitaria constituye uno de los componentes más relevantes del conocimiento generado sobre *J. neotropica*. En el corpus analizado se identificaron **115 tesis y trabajos de titulación**, de los cuales **111 correspondieron al nivel de pregrado y cuatro al nivel de maestría**. Esta distribución evidencia que la investigación académica sobre la especie se ha desarrollado principalmente mediante procesos de formación profesional, mientras que su incorporación a programas de posgrado ha sido comparativamente limitada. No obstante, como se analiza posteriormente, la formación doctoral reciente vinculada con líneas institucionales sobre *J. neotropica* muestra avances hacia niveles de mayor especialización.

La producción de tesis presenta, además, una marcada concentración institucional y geográfica. La Universidad Técnica del Norte (UTN) registró 49 trabajos, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), 19, y la Universidad Nacional de Loja (UNL), 16. En conjunto, estas tres instituciones aportaron **84 de las 115 tesis identificadas (73,0 %)**. Esta concentración permite reconocer tres núcleos principales de generación de conocimiento en Ecuador, localizados en el norte, centro y sur de la región andina, respectivamente. La distribución no implica ausencia de investigación en otras universidades, sino una mayor continuidad y acumulación de trabajos en estas

instituciones. La distribución completa de las tesis y los trabajos de titulación según la institución de procedencia se presenta en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3

Distribución de las tesis y los trabajos de titulación según la institución de procedencia

Universidad o grupo de universidades	N.º de tesis	%
Universidad Técnica del Norte (UTN), Ibarra	49	42,6
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba	19	16,5
Universidad Nacional de Loja (UNL), Loja	16	13,9
Universidades de Perú	11	9,6
Universidad de Guayaquil	4	3,5
Universidad de Cuenca	3	2,6
Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL)	2	1,7
Universidades de Colombia	2	1,7
Universidad UTE, Quito	2	1,7
Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca	2	1,7
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE	1	0,9
Escuela Politécnica Nacional	1	0,9
Universidad Estatal Amazónica	1	0,9
Universidad Técnica de Ambato	1	0,9
Universidad Central del Ecuador	1	0,9
Total	**115**	**100,0**

Nota. Las universidades de Perú y Colombia se presentan agrupadas porque las tesis incluidas proceden de varias instituciones. La búsqueda realizada en Ecuador tuvo alcance nacional, mientras que para Perú y Colombia se incorporaron únicamente los trabajos seleccionados por su pertinencia para los temas abordados en esta obra; por tanto, estos valores no representan un inventario exhaustivo de la producción académica sobre *J. neotropica* en dichos países. Los porcentajes se calcularon con relación al total de 115 tesis y trabajos de titulación incluidos en el corpus.

La distribución evidencia que, aunque la producción académica comprende diversas instituciones nacionales y aportes de universidades de otros países, existe una concentración importante en los tres núcleos ecuatorianos señalados. Este predominio adquiere mayor relevancia al considerar que la investigación universitaria no se ha limitado a la elaboración de trabajos individuales de titulación. En estas instituciones se han desarrollado proyectos y líneas de investigación que han permitido mantener continuidad temática, incorporar nuevos estudiantes y ampliar progresivamente las dimensiones estudiadas de la especie. Esta dinámica ha favorecido el tránsito desde investigaciones puntuales hacia procesos institucionales de generación de conocimiento, aunque con diferencias de trayectoria, organización y énfasis temático entre las universidades.

2.5.1. De los trabajos de titulación a la publicación científica

La elevada participación de las tesis en el corpus plantea una cuestión relevante: en qué medida el conocimiento generado durante la formación universitaria ha trascendido los repositorios institucionales y ha alcanzado medios formales de comunicación científica. El análisis de las correspondencias conservadas durante la depuración documental permitió identificar **26 tesis de pregrado que dieron origen a artículos científicos**, equivalentes al **23,4 % de los 111 trabajos de este nivel académico**. De estos artículos derivados, 14 se vincularon con investigaciones desarrolladas en la UTN, siete con trabajos de la UNL y cinco con investigaciones de la ESPOCH.

Este resultado evidencia que los trabajos de titulación han constituido, en determinados casos, una etapa inicial de procesos posteriores de publicación científica. La transformación de aproximadamente una cuarta parte de las tesis de pregrado en artículos representa un mecanismo de transferencia del conocimiento desde la investigación formativa hacia medios con mayor circulación y visibilidad académica. Para las **85 tesis de pregrado restantes (76,6 %)** no se identificó, dentro de los documentos examinados, una publicación científica derivada. Esto no permite afirmar que sus resultados no hayan sido difundidos por otras vías, pero sí confirma la importancia de las tesis como fuentes primarias para recuperar una parte sustancial del conocimiento generado sobre *J. neotropica*.

La distribución institucional de los artículos derivados muestra, además, que este proceso se concentra en las mismas universidades que reúnen una parte importante de la producción académica sobre la especie. En este sentido, la conversión de trabajos de titulación en artículos constituye un indicador de continuidad entre la formación profesional, la generación de conocimiento y la comunicación científica, y representa una vía que puede fortalecerse para ampliar la accesibilidad y proyección de los resultados obtenidos en las universidades.

2.5.2. Consolidación de líneas de investigación y formación especializada

La producción académica sobre *J. neotropica* muestra que, junto con la acumulación de trabajos de titulación, algunas universidades ecuatorianas han avanzado hacia líneas de investigación con mayor continuidad y especialización. Este proceso resulta particularmente visible en los núcleos académicos de Loja, Chimborazo e Imbabura, donde se han desarrollado sucesivamente proyectos institucionales y estudios sobre diferentes componentes de la especie. De esta manera, la investigación ha comenzado a superar el carácter aislado de determinados trabajos académicos para integrarse en procesos institucionales de mayor duración.

La marcada concentración de los trabajos de titulación en el pregrado constituye una base importante para la generación de conocimiento y la formación de nuevos investigadores. En contraste, la reducida participación de investigaciones de maestría evidencia un espacio todavía amplio para incorporar el estudio de *J. neotropica* en programas de posgrado y desarrollar investigaciones de mayor profundidad, duración e integración temática.

Además de los trabajos contabilizados en el corpus, adquiere especial relevancia la incorporación reciente de *J. neotropica* en procesos de formación doctoral. Desde los núcleos académicos de Loja y Chimborazo se han desarrollado dos procesos doctorales centrados en la especie y vinculados con una universidad europea: uno ya concluido, del cual se derivaron publicaciones científicas, y otro actualmente en desarrollo. Aunque estas experiencias son todavía puntuales, representan un avance cualitativo en la trayectoria de investigación, al extender el estudio del nogal andino hacia la formación científica de máximo nivel y favorecer su articulación con redes académicas internacionales.

En Imbabura, la continuidad de la investigación adquirió una expresión institucional mediante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) de la Universidad Técnica del Norte, que articuló diferentes proyectos y trabajos de titulación alrededor de la especie. En Loja y Chimborazo, la continuidad de proyectos y su articulación con procesos de formación doctoral representan otras vías de fortalecimiento de capacidades especializadas. Estas experiencias, desarrolladas mediante estructuras institucionales diferentes, evidencian la progresiva consolidación de núcleos de investigación sobre *J. neotropica* en el norte, centro y sur del Ecuador.

En conjunto, la trayectoria académica muestra una base amplia de investigación en pregrado, una participación todavía limitada en maestría y los primeros avances hacia la formación doctoral especializada. Esta progresión permite reconocer tanto el fortalecimiento alcanzado como una oportunidad para la siguiente etapa: ampliar la investigación de posgrado, promover estudios interinstitucionales y de mayor duración, y fortalecer la cooperación entre los núcleos nacionales y las redes científicas internacionales.

2.6. Tendencias temáticas y grado de desarrollo del conocimiento

La producción bibliográfica analizada evidencia que el conocimiento sobre *J. neotropica* se ha desarrollado de manera desigual entre áreas temáticas. Algunos componentes cuentan con una trayectoria relativamente amplia y con evidencia procedente de diferentes tipos de fuentes, mientras que otros dependen todavía de un número reducido de investigaciones, estudios localizados o trabajos de titulación. Esta heterogeneidad es característica de una especie forestal nativa cuyo estudio ha respondido tanto a intereses de conservación como a necesidades de propagación, manejo, aprovechamiento y valoración de sus productos y servicios.

Una primera línea de conocimiento comprende los estudios relacionados con la **identidad taxonómica, botánica, distribución geográfica, ecología, genética y conservación** de la especie. Las descripciones taxonómicas y florísticas constituyeron parte de los antecedentes iniciales, mientras que investigaciones posteriores ampliaron el conocimiento sobre su distribución, requerimientos ambientales, estado de conservación y relaciones filogenéticas. Más recientemente, la incorporación de herramientas moleculares, información geoespacial y modelos de distribución ha permitido abordar preguntas relacionadas con la diversidad genética, la estructura poblacional, la idoneidad ambiental y la respuesta potencial frente a cambios en las condiciones climáticas. Esta trayectoria muestra el tránsito desde una fase predominantemente descriptiva hacia aproximaciones analíticas apoyadas en herramientas genéticas y espaciales.

Un segundo eje está constituido por la **calidad de las semillas, la propagación, la viverización, el establecimiento y el manejo inicial de plantaciones**. La elevada presencia de trabajos universitarios en estas áreas refleja la necesidad de resolver problemas prácticos asociados con la producción de material vegetal y el establecimiento de la especie. Los estudios han abordado características físicas, fisiológicas y sanitarias de las semillas, tratamientos pregerminativos, sustratos, procedencias, propagación sexual y vegetativa, crecimiento inicial y prácticas de establecimiento. En conjunto, estas investigaciones han generado una base aplicada importante para la producción de plantas y el manejo temprano de *J. neotropica*, aunque una parte sustancial de la evidencia procede de tesis y ensayos desarrollados bajo condiciones locales.

La **silvicultura, el crecimiento y la productividad** constituyen otra línea que ha adquirido mayor relevancia durante las últimas décadas. Los estudios disponibles comprenden crecimiento diamétrico y en altura, análisis dendrocronológicos, relaciones dasométricas, modelos de volumen, índices de sitio, turnos biológicos y respuestas a diferentes condiciones de establecimiento y manejo. Estos avances representan un cambio importante respecto de etapas anteriores, en las que las recomendaciones silviculturales dependían en mayor medida de observaciones generales o de conocimientos transferidos desde otras especies forestales. La incorporación progresiva de mediciones de campo, series de crecimiento y herramientas de modelación ha permitido establecer bases cuantitativas para interpretar el desarrollo y la productividad de la especie.

Un cuarto ámbito corresponde a los **sistemas agroforestales y a la integración de *J. neotropica* en paisajes productivos**. La documentación disponible registra su presencia en linderos, asociaciones con cultivos, sistemas con café, arreglos silvopastoriles y otras configuraciones agroforestales. Estos estudios amplían la visión tradicional del nogal como una especie exclusivamente forestal o maderable y muestran su función como componente de sistemas productivos diversificados. La evidencia disponible combina la documentación de prácticas tradicionales y experiencias productivas con investigaciones recientes sobre estructura, manejo e interacciones dentro de los sistemas agroforestales.

La investigación sobre **productos, propiedades de la madera, frutos, compuestos bioactivos y otros usos** presenta una diversificación temática considerable. Los trabajos comprenden características anatómicas, físicas y mecánicas de la madera; utilización alimentaria de las nueces; extracción y caracterización de aceites; propiedades fitoquímicas; aplicaciones medicinales; y usos artesanales, gastronómicos y culturales. Esta diversidad confirma el carácter multipropósito de *J. neotropica* y amplía su valoración más allá de la producción de madera. La literatura permite distinguir entre usos tradicionales, propiedades verificadas mediante estudios experimentales y aplicaciones que comienzan a proyectarse hacia el desarrollo de productos.

Los **servicios ecosistémicos** representan un campo de desarrollo más reciente. Las investigaciones incorporadas en la obra incluyen aproximaciones relacionadas con almacenamiento de carbono, regulación microclimática, relaciones con el suelo, biodiversidad asociada y funciones de la especie dentro de sistemas agroforestales y paisajes intervenidos. Estos estudios han comenzado a ampliar la comprensión funcional de *J. neotropica* y a situarla no solo como fuente de productos, sino también como

componente arbóreo capaz de contribuir al funcionamiento ecológico de los sistemas en los que se encuentra.

Finalmente, los componentes **económicos, de mercado, cadenas de valor y bioeconomía** presentan un desarrollo comparativamente menor frente a los aspectos biológicos, silviculturales y de propagación. La información disponible comprende productos, usos, costos de determinadas actividades de producción y algunas experiencias productivas y comerciales. Sin embargo, son menos frecuentes los estudios que integran rentabilidad, formación de precios, mercados, demanda, transformación, agregación de valor y valoración económica de los servicios ecosistémicos. En consecuencia, esta dimensión representa uno de los campos más incipientes dentro del conocimiento reunido sobre la especie.

A partir de la amplitud, continuidad y naturaleza de la evidencia analizada, pueden reconocerse **tres niveles generales de desarrollo del conocimiento**. El primero comprende áreas con una base relativamente amplia de investigación, entre ellas semillas, propagación, viverización, establecimiento y determinados componentes silviculturales. El segundo agrupa campos en proceso de consolidación, como genética, crecimiento y modelación, sistemas agroforestales, productos y servicios ecosistémicos. El tercero corresponde a ámbitos todavía incipientes, particularmente economía, mercados, cadenas de valor y bioeconomía. Esta clasificación no constituye una medición cuantitativa de madurez científica, sino una valoración interpretativa del grado relativo de desarrollo de los distintos campos representados en el corpus.

La trayectoria temática evidencia, por tanto, una progresiva diversificación del estudio de *J. neotropica*: desde conocimientos inicialmente concentrados en taxonomía, distribución, usos y silvicultura básica hacia aproximaciones que incorporan genética, modelación, dendrocronología, agroforestería, servicios ecosistémicos y bioeconomía. Esta ampliación ha permitido construir una comprensión más integral de la especie, pero también revela diferencias en la solidez, continuidad y representatividad de la evidencia disponible. Sobre esta base, el apartado siguiente examina los principales vacíos de conocimiento y las prioridades que pueden orientar el desarrollo futuro de la investigación.

2.7. Vacíos de conocimiento y prioridades de investigación

El incremento de la producción bibliográfica durante las últimas décadas ha ampliado considerablemente el conocimiento disponible sobre *J. neotropica*; sin embargo, la cantidad de documentos no implica que todas las dimensiones relevantes para la conservación y el manejo de la especie presenten el mismo grado de cobertura. El análisis del corpus evidencia diferencias en continuidad temporal, representatividad geográfica, escala de observación y profundidad metodológica. En varios ámbitos, el desafío actual consiste menos en iniciar nuevas líneas de estudio que en **ampliar, integrar y validar conocimientos generados principalmente en localidades o condiciones experimentales específicas**.

Uno de los campos prioritarios corresponde a la **diversidad genética y la estructura de las poblaciones**. Las investigaciones existentes han establecido bases para caracterizar procedencias y variabilidad genética; no obstante, la amplitud de la

distribución andina de *J. neotropica*, la fragmentación de sus poblaciones y la heterogeneidad ambiental de los sitios donde persiste justifican ampliar el muestreo geográfico y la caracterización genética. La integración de información genómica, fenotípica, ecológica y geográfica permitiría identificar unidades relevantes para la conservación, evaluar la diferenciación entre poblaciones y fortalecer los criterios para seleccionar fuentes de germoplasma destinadas a conservación, restauración y mejoramiento genético.

Un segundo desafío se relaciona con la **representatividad espacial y temporal de la información sobre crecimiento y productividad**. Los parámetros generados mediante estudios dendrocronológicos, dasométricos y silviculturales muestran que el desempeño de la especie puede variar considerablemente según las condiciones ambientales y de manejo. En consecuencia, resulta prioritario ampliar los ensayos multisitio, establecer y mantener parcelas permanentes, y desarrollar series de observación de largo plazo que permitan evaluar crecimiento, mortalidad, competencia y productividad bajo diferentes condiciones ecológicas y sistemas de manejo. Esta información permitiría determinar el ámbito de aplicación de los modelos de volumen, índices de sitio, turnos biológicos y demás parámetros desarrollados para localidades específicas.

La **respuesta de *J. neotropica* frente al cambio climático** constituye otro campo que requiere mayor desarrollo. La información climática y los modelos de distribución permiten caracterizar las relaciones actuales entre la presencia de la especie y las condiciones ambientales, pero la evaluación de escenarios futuros demanda modelos específicamente diseñados y validados para ese propósito. La combinación de registros de ocurrencia, procedencias, diversidad genética, crecimiento y variables ambientales permitiría avanzar desde diagnósticos de exposición y vulnerabilidad hacia evaluaciones más robustas de posibles cambios en idoneidad ambiental, conectividad y capacidad adaptativa. Este conocimiento sería particularmente relevante para orientar la conservación *in situ* y *ex situ*, la restauración y la selección de material reproductivo.

En **propagación y establecimiento**, la prioridad no radica únicamente en generar nuevos tratamientos experimentales, sino en determinar la consistencia de los resultados existentes entre procedencias, años, condiciones de vivero y sitios de plantación. La base experimental disponible se encuentra frecuentemente asociada con periodos relativamente cortos y condiciones locales. Por ello, la estandarización de protocolos, la evaluación comparativa entre procedencias y el seguimiento de las plantas después del establecimiento permitirían determinar en qué medida las respuestas observadas durante la germinación y la viverización se traducen posteriormente en mayor supervivencia, crecimiento y calidad de los árboles en campo.

Los **sistemas agroforestales** representan una oportunidad especialmente importante para conectar conservación y producción. La presencia de *J. neotropica* en linderos, asociaciones con cultivos, sistemas con café y arreglos silvopastoriles demuestra la diversidad de contextos productivos en los que puede integrarse la especie. Sin embargo, se requiere profundizar en la cuantificación de las interacciones entre sus componentes, incluyendo competencia y complementariedad por luz, agua y nutrientes, efectos sobre los cultivos y el suelo, productividad conjunta, diseño espacial y respuesta a diferentes intensidades de manejo. La evaluación de estos procesos a escala de sistema

permitiría avanzar desde la documentación de experiencias y arreglos existentes hacia recomendaciones agroforestales sustentadas en indicadores productivos, ecológicos y económicos.

Una situación semejante se presenta en el estudio de los **servicios ecosistémicos**. Es necesario ampliar la replicación espacial y temporal de las investigaciones, establecer comparaciones con sistemas de referencia y diferenciar los efectos atribuibles a *J. neotropica* de aquellos asociados con el uso previo del suelo, la composición del sistema, las condiciones edáficas y el manejo. Esta precaución resulta esencial para evitar atribuciones causales que excedan la capacidad explicativa de los diseños experimentales disponibles y para establecer estimaciones más robustas sobre almacenamiento de carbono, regulación microclimática, relaciones con el suelo y biodiversidad asociada.

Los mayores vacíos se observan en la **dimensión económica y en la articulación del conocimiento biológico con las cadenas de valor y la bioeconomía**. Aunque existe información sobre madera, nueces, aceites, compuestos bioactivos, usos tradicionales y otros productos, son comparativamente escasos los estudios que analizan de manera integrada costos, rentabilidad, formación de precios, mercados, demanda, transformación, agregación de valor y viabilidad económica de diferentes alternativas de manejo. El desarrollo de esta línea permitiría determinar cuáles de los potenciales identificados experimentalmente pueden convertirse en oportunidades productivas sostenibles y cuáles requieren todavía investigación tecnológica, evaluación de mercado o desarrollo empresarial.

De manera transversal, persiste el desafío de **fortalecer la circulación y visibilidad del conocimiento generado por las universidades**. Las tesis constituyen el componente proporcionalmente más especializado del corpus, pero una parte importante de sus resultados permanece vinculada principalmente con repositorios institucionales. Aunque determinados trabajos de titulación han dado origen a artículos científicos, existe la oportunidad de incrementar la transformación de resultados relevantes en publicaciones arbitradas, bases de datos, protocolos técnicos y otros productos accesibles para comunidades académicas, profesionales, productores y responsables de la gestión forestal. Esta transferencia contribuiría a evitar la repetición innecesaria de experimentos y facilitaría la comparación y validación de resultados.

La fragmentación temática e institucional del conocimiento plantea, además, la necesidad de avanzar hacia una **mayor integración de información y cooperación entre grupos de investigación**. La existencia de núcleos académicos con continuidad en el norte, centro y sur del Ecuador proporciona una base favorable para desarrollar ensayos coordinados, compartir protocolos y datos, comparar procedencias y evaluar respuestas de la especie a lo largo de gradientes ambientales. La articulación entre genética, ecología, silvicultura, agroforestería, servicios ecosistémicos y economía permitiría superar enfoques predominantemente sectoriales y avanzar hacia una comprensión integral de *J. neotropica* como recurso forestal, componente de los paisajes andinos y especie de interés para la conservación y el uso sostenible.

En este contexto, las prioridades futuras pueden organizarse en cuatro orientaciones complementarias: **ampliar la representatividad espacial y temporal de la evidencia; fortalecer la integración entre genética, ambiente y desempeño**

fenotípico; evaluar los sistemas de manejo mediante aproximaciones ecológicas, productivas y económicas integradas; y mejorar la articulación y difusión del conocimiento generado por universidades y grupos de investigación. Estas prioridades no implican sustituir las líneas actualmente desarrolladas, sino consolidar sus resultados mediante estudios comparables, de mayor duración y con capacidad para generar recomendaciones aplicables a diferentes condiciones de los Andes ecuatorianos.

El estado del conocimiento delimitado en este capítulo proporciona el marco para los capítulos siguientes, en los que se examinan las dimensiones históricas y culturales, botánicas y genéticas, ecológicas, fenológicas, de propagación, silviculturales, agroforestales, productivas, ecosistémicas y económicas de *J. neotropica*. La integración de estos componentes permite comprenderlos como partes de un mismo desafío: conservar la diversidad de la especie y desarrollar formas científicamente sustentadas de manejo y uso que contribuyan a su permanencia y valoración en los paisajes andinos.

CAPÍTULO 3

Historia ambiental y patrimonio biocultural de *Juglans neotropica* en Ecuador

Capítulo

3

Historia ambiental y patrimonio biocultural de *Juglans neotropica* en Ecuador

Escultura tallada en madera de nogal (*J. neotropica*) por el artista Juan Padilla, San Antonio de Ibarra, Imbabura, Ecuador. Fotografía: Mario Añazco.

El presente capítulo se centra en la dimensión histórica, cultural y patrimonial de *Juglans neotropica* en el Ecuador. A partir de fuentes documentales, registros históricos y evidencias generadas por el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), se examina la relación entre la especie y las sociedades andinas, abordando sus usos tradicionales, su importancia en la artesanía, la gastronomía y los saberes locales, así como su contribución al patrimonio biocultural y a la identidad territorial. Este enfoque permite comprender que la conservación de *J. neotropica* no depende únicamente de sus atributos biológicos y ecológicos, sino también del reconocimiento de los valores históricos, culturales y sociales que han sustentado su permanencia en los paisajes andinos.

Los aspectos relacionados con la botánica, la filogenia y la evolución de Juglans neotropica se desarrollan en el Capítulo 4, mientras que su distribución geográfica, nicho ecológico y respuesta frente al cambio climático se analizan en el Capítulo 5.

3.1. Historia ambiental de *J. neotropica* en Ecuador

La historia de *J. neotropica* en Ecuador puede reconstruirse a partir de fuentes documentales, registros botánicos, estudios etnobotánicos y evidencia histórica sobre el aprovechamiento de los recursos forestales andinos. A diferencia de otras especies del género *Juglans*, cuya historia ha sido ampliamente documentada en Europa y Asia, el conocimiento histórico del nogal andino proviene principalmente de investigaciones realizadas en los Andes septentrionales durante los siglos XIX, XX y XXI. Estos registros muestran que la especie ha mantenido una relación continua con las poblaciones humanas, tanto por sus múltiples usos como por su presencia en los paisajes forestales y agroforestales del país.

3.1.1. Primeros registros históricos del nogal andino

Los primeros registros documentados sobre *J. neotropica* en Ecuador corresponden a descripciones botánicas y forestales realizadas durante los siglos XIX y XX, las cuales reconocen a la especie como uno de los árboles nativos de mayor importancia en los bosques montanos andinos. Posteriormente, inventarios florísticos, estudios dendrológicos y publicaciones sobre flora ecuatoriana ampliaron el conocimiento sobre su distribución, características botánicas y aprovechamiento tradicional (Montalvo & Cerón, 2003; Viteri et al., 1989).

Durante la época colonial y los primeros años de la República existen referencias al empleo de la madera del nogal en edificaciones religiosas, mobiliario y trabajos de ebanistería desarrollados principalmente en ciudades andinas como Quito y Cuenca, donde la disponibilidad de maderas finas provenientes de los bosques montanos favoreció su utilización en obras arquitectónicas y artísticas (Viteri et al., 1989). Estas referencias constituyen algunos de los primeros testimonios documentados sobre el aprovechamiento histórico de la especie en el territorio ecuatoriano.

3.1.2. Usos tradicionales documentados

La documentación histórica disponible muestra que el aprovechamiento de *J. neotropica* ha estado asociado principalmente a tres usos tradicionales. El primero corresponde a la utilización de su madera en carpintería, ebanistería y elaboración de elementos arquitectónicos y artísticos, actividad ampliamente registrada en la literatura forestal y etnobotánica (Viteri et al., 1989).

Un segundo uso históricamente documentado corresponde al empleo de hojas, corteza y otras estructuras vegetales dentro de la medicina tradicional, especialmente en comunidades rurales andinas, donde diferentes preparados han sido utilizados con fines terapéuticos (Montalvo & Cerón, 2003).

Finalmente, diversas publicaciones registran el empleo de la madera en la fabricación de instrumentos musicales tradicionales, aprovechando sus características físicas y acústicas, particularmente en talleres artesanales de la Sierra ecuatoriana (Ospina et al., 2003). Estos antecedentes evidencian que el nogal andino ha formado parte de las actividades productivas del país desde épocas tempranas, aunque el alcance cultural de estos usos se analiza en apartados posteriores del presente capítulo.

3.1.3. Valor ecológico e historia de la conservación

Desde el punto de vista ecológico, *J. neotropica* constituye una especie característica de los bosques montanos andinos, donde participa en procesos fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas. Su presencia contribuye a la protección del suelo, al mantenimiento de la cobertura forestal, al reciclaje de nutrientes mediante el aporte de hojarasca y frutos, y a la provisión de hábitat para diversas especies de fauna (Rave-Oviedo et al., 2013).

La transformación progresiva de los bosques andinos durante el último siglo provocó una reducción importante de las poblaciones naturales de la especie debido a la expansión agrícola, la extracción selectiva de madera y la fragmentación del hábitat. En este contexto, la conservación y restauración de las poblaciones remanentes adquieren especial relevancia.

En respuesta a esta situación, instituciones públicas, universidades y gobiernos locales han impulsado iniciativas orientadas a la conservación, producción de plantas, establecimiento de plantaciones y restauración de bosques andinos con especies nativas, entre ellas *J. neotropica* (Ministerio de Ambiente y Energía [MAE], 2025). Estas acciones representan el tránsito desde una visión centrada exclusivamente en el aprovechamiento forestal hacia un enfoque que reconoce simultáneamente su importancia ecológica, científica y social.

La evolución histórica del manejo de *J. neotropica* permite comprender que esta especie ha trascendido su condición de recurso forestal para convertirse en un componente relevante de los paisajes andinos y de la relación entre sociedad y naturaleza. Sobre esta base histórica se sustenta el reconocimiento contemporáneo del nogal andino como parte del patrimonio biocultural del Ecuador, tema que se desarrolla en el siguiente apartado.

3.2. *J. neotropica* como patrimonio biocultural del Ecuador

¿Cómo llegó *J. neotropica* a convertirse en un elemento del patrimonio biocultural del Ecuador?

La relación entre las sociedades andinas y *J. neotropica* se ha construido a través del tiempo mediante múltiples formas de interacción con el árbol y los territorios donde este se encuentra. Sus usos, los conocimientos asociados a su manejo y aprovechamiento, y su presencia en prácticas productivas y expresiones culturales permiten analizar la especie desde una perspectiva que integra naturaleza y cultura. Bajo este enfoque, el nogal adquiere una dimensión biocultural que trasciende su valor estrictamente forestal y permite comprender los vínculos históricos y contemporáneos establecidos entre la especie, las comunidades y los paisajes andinos.

3.2.1. Árbol integrador del territorio

A lo largo del Ecuador continental, *J. neotropica* —conocido como nogal o tocte— representa una de las expresiones más claras de la relación histórica entre biodiversidad, territorio y cultura. Su distribución natural, que enlaza la región Andina con las estribaciones amazónicas y las zonas de transición hacia la Costa, ha favorecido su incorporación sostenida en paisajes habitados, sistemas productivos tradicionales y prácticas culturales locales. Esta continuidad espacial ha convertido al nogal andino en un referente vivo de integración territorial, donde los procesos ecológicos y socioculturales se entrelazan a lo largo del tiempo.

En los Andes, el nogal ha formado parte del paisaje rural y urbano, asociado a chacras, huertos familiares, caminos y espacios públicos. Su madera, frutos y sombra han sustentado prácticas artesanales, alimentarias y simbólicas, reforzando su presencia en la memoria colectiva de comunidades campesinas y urbanas. Desde una perspectiva de historia ambiental, estas interacciones reflejan procesos de coevolución entre sociedad y naturaleza, en los que las especies forestales nativas adquieren significados que trascienden su valor utilitario (Williams, 2003; Worster, 1990).

Hacia las estribaciones andino-amazónicas, *J. neotropica* se integra en paisajes de alta diversidad biológica y cultural, donde los sistemas agroforestales y el conocimiento local reconocen su función como árbol de enlace entre ecosistemas y territorios. Este rol se inscribe en lo que la literatura define como **patrimonio biocultural**, entendido como el conjunto indivisible de biodiversidad, saberes tradicionales y prácticas de manejo construidas históricamente por las sociedades humanas (Maffi, 2005; Toledo & Barrera-Bassols, 2008). En este contexto, el nogal andino actúa como especie puente, tanto en términos ecológicos como culturales, facilitando la continuidad de conocimientos, usos y significados a lo largo de gradientes altitudinales y regionales.

En las zonas húmedas de transición hacia la Costa, la presencia del nogal amplía el contexto territorial en el que la especie forma parte de paisajes intervenidos y sistemas productivos. Sin embargo, estos registros no permiten, por sí solos, inferir la existencia de antiguos corredores ecológicos o culturales entre la Sierra y las tierras bajas. Desde una perspectiva contemporánea, la integración de árboles nativos en paisajes productivos resulta relevante frente a la fragmentación y la degradación del paisaje (FAO, 2018).

En síntesis, *J. neotropica* no solo constituye un recurso forestal de alto valor ecológico y económico, sino también un elemento central del patrimonio biocultural del Ecuador continental. Su conservación y manejo sostenible implican, por tanto, no solo la protección de una especie nativa, sino la salvaguarda de los vínculos históricos, culturales y territoriales que esta ha tejido entre las tres regiones naturales del país.

3.2.2. Árbol patrimonial del Ecuador

La declaratoria de árboles patrimoniales en el Ecuador constituye un mecanismo fundamental para la protección del arbolado urbano con alto valor histórico, cultural, paisajístico y ecológico. Dentro de estas declaratorias, *J. neotropica* —conocido como nogal andino— ha sido reconocido en varias ciudades debido a su importancia biocultural y a su arraigo en la memoria colectiva de las poblaciones andinas.

En el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, la inclusión de ejemplares de *J. neotropica* en los listados de árboles patrimoniales (Polo et al., 2017) responde a la necesidad de resguardar individuos longevos cuya presencia antecede, en muchos casos, a la consolidación urbana moderna. Estos árboles, ubicados en barrios tradicionales, antiguas haciendas o áreas periurbanas, se han mantenido como hitos del paisaje y como elementos identitarios para las comunidades locales. Su protección implica no solo el reconocimiento de su valor ecológico como reservorios de biodiversidad urbana, sino también el resguardo de su significado histórico, asociado a prácticas agrícolas, delimitación de antiguos caminos y producción artesanal vinculada a la madera de nogal.

En la ciudad de Cuenca, el Centro Interamericano de Artesanías y Artes Populares (CIDAP, 2016) también ha documentado y puesto en valor a ejemplares de *J. neotropica* dentro de la categoría de árboles patrimoniales. La presencia del nogal andino en el entorno cuencano ha estado tradicionalmente ligada a su rol como especie proveedora de madera fina para la elaboración de mobiliario y artesanías, actividad que forma parte del acervo cultural de la región austral. Varios ejemplares patrimoniales han sido asociados a viviendas históricas, espacios productivos y sectores en los que el nogal ha acompañado los procesos de asentamiento humano, configurando paisajes culturales que integran naturaleza y sociedad (Guzmán et al., 2023). Minga & Verdugo (2016) mencionan a *J. neotropica* formando parte de los árboles inventariados en las cercanías de los cuatro ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca.

La designación de *J. neotropica* como árbol patrimonial en Quito y Cuenca revela una convergencia entre conservación biológica, memoria social y salvaguardia del patrimonio cultural. En un contexto de acelerada expansión urbana y disminución de los bosques andinos, estos reconocimientos adquieren mayor relevancia, pues permiten visibilizar la necesidad de proteger árboles individuales que simbolizan procesos históricos y ecológicos más amplios. Además, constituyen una oportunidad para fortalecer programas municipales de arbolado urbano, educación ambiental y participación comunitaria orientados a valorar el rol del nogal andino como parte integral del paisaje urbano y de la identidad regional.

3.2.3. Longevidad y conservación de los bosques naturales de *J. neotropica*

El bosque natural de *J. neotropica* de la Reserva Natural El Tundo, ubicada en el cantón Sozoranga (provincia de Loja), constituye uno de los remanentes maduros mejor conservados de nogal andino en el Ecuador. Este bosque presenta una estructura sucesional avanzada, con individuos que alcanzan diámetros superiores a 110 cm y edades estimadas de hasta 355 años, lo que evidencia la elevada longevidad potencial de la especie bajo condiciones naturales y un alto grado de conservación ecológica. Asimismo, la continuidad de aproximadamente 140 ha de cobertura dominada por *J. neotropica* convierte a este sitio en el rodal natural más extenso conocido para la especie en el sur del Ecuador y, probablemente, en uno de los bosques con mayor dominancia de nogal andino registrados en Sudamérica (Cueva, 2018; Guamán, 2023; Palacios-Herrera et al., 2025b).

La presencia de árboles centenarios en El Tundo pone de manifiesto la capacidad de *J. neotropica* para persistir durante varios siglos cuando se mantienen condiciones de bosque continuo y baja intervención antrópica. Estas características confieren a este rodal un extraordinario valor ecológico, genético y científico, al constituir un referente para investigaciones sobre dinámica forestal, conservación de recursos genéticos, adaptación al cambio climático y restauración de bosques andinos.

3.2.4. La Chakra Andina como SIPAM

La Chakra Andina de las comunidades Kichwas de Cotacachi (Imbabura, Ecuador) fue reconocida en mayo de 2023 como Sistema Importante del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM) por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Esta designación responde a su valor como sistema socioecológico tradicional que integra diversidad biológica, conocimiento ancestral y manejo sostenible del territorio andino.

Este sistema agrícola se desarrolla en un gradiente altitudinal comprendido entre 2 500 y 3 400 m s. n. m. en la Sierra de Cotacachi, donde interactúan diversos pisos ecológicos que configuran una alta heterogeneidad ambiental y productiva (Ministerio de Agricultura y Ganadería et al., 2022). La Chakra se caracteriza por arreglos agroforestales complejos, policultivos, asociaciones y rotaciones tradicionales, así como por la conservación *in situ* de recursos fitogenéticos nativos. Estas prácticas fortalecen la resiliencia frente a la variabilidad climática, mantienen la estabilidad productiva y contribuyen a la seguridad y soberanía alimentaria de las comunidades locales.

En este contexto, *J. neotropica* (nogal, tocte o tukti) forma parte de la estructura agroforestal del sistema. La especie se encuentra comúnmente como individuo disperso dentro de las parcelas agrícolas o formando parte de linderos vivos en los predios de las familias kichwas. Además de su valor alimenticio y maderable, cumple funciones ecológicas relevantes, incluyendo regulación microclimática, protección del suelo, aporte de biomasa y contribución a la conectividad biológica del paisaje agrícola.

El reconocimiento como SIPAM subraya la importancia de los sistemas agrícolas indígenas como modelos de manejo sostenible del territorio, conservación de agrobiodiversidad y gobernanza comunitaria basada en conocimientos tradicionales,

consolidando a la Chakra Andina como un referente de sostenibilidad en los Andes ecuatorianos.

3.3. Identidad territorial y patrimonio cultural asociado al nogal

En los territorios andinos del Ecuador, el nogal ha trascendido su condición de recurso forestal para integrarse en diversas expresiones de la vida social y cultural. Su madera, frutos, semillas, hojas y otras partes del árbol han sustentado prácticas, conocimientos y oficios que, transmitidos entre generaciones, contribuyen a configurar vínculos entre la especie, las comunidades y sus territorios. Estas relaciones se manifiestan de distintas formas a lo largo de la Sierra ecuatoriana, desde la reconocida tradición artesanal de San Antonio de Ibarra y otros usos artesanales de la especie, hasta preparaciones gastronómicas basadas en el tocte y prácticas tradicionales de obtención de tintes naturales. A estas expresiones se suma la Ruta del Nogal, concebida como una estrategia de articulación y valorización del patrimonio biocultural asociado a la especie. En conjunto, estas dimensiones permiten comprender al nogal no solo por sus usos, sino como una especie vinculada con la identidad territorial, la memoria cultural y los conocimientos tradicionales de diferentes comunidades andinas del Ecuador.

3.3.1. La tradición artesanal de San Antonio de Ibarra

Uno de los principales hitos históricos asociados a *J. neotropica* en la provincia de Imbabura se relaciona con el proceso de reconstrucción de la ciudad de Ibarra tras el terremoto del 16 de agosto de 1868, considerado uno de los desastres naturales más devastadores ocurridos en la Sierra norte del Ecuador. Este desastre causó la muerte de cientos de personas y daños materiales generalizados, afectando particularmente las iglesias y las imágenes religiosas que albergaban.

El entonces presidente del Ecuador, Gabriel García Moreno, impulsó la reconstrucción de la ciudad mediante un plan de recuperación urbana que incluyó la restauración de templos, altares e imaginería religiosa. Para ello, convocó a artesanos y escultores en la localidad de San Antonio de Ibarra, situada a seis kilómetros de la capital provincial, contribuyendo decisivamente a la consolidación y expansión de la tradición artesanal de San Antonio de Ibarra (Viteri et al., 1989).

Los primeros talladores, conocidos como "santeros", se especializaron en la escultura de imágenes religiosas, retablos y altares para iglesias. Con el tiempo, la producción se diversificó hacia nuevas temáticas, como representaciones de mendigos, escenas costumbristas de parejas indígenas bailando y, posteriormente, animales, figuras abstractas, murales y bustos (Viteri et al., 1989).

La técnica del tallado en madera desarrollada en San Antonio de Ibarra constituye una de las manifestaciones culturales más representativas del Ecuador. A través de la transmisión intergeneracional de conocimientos y destrezas, esta práctica ha preservado el legado artístico de varias generaciones de maestros escultores, consolidándose como una expresión viva del patrimonio cultural. En reconocimiento a su valor histórico, artístico y social, el 18 de septiembre de 2020 fue incorporada a la Lista Representativa del Patrimonio Cultural Inmaterial del Ecuador (Bravo & Tabango, 2023; Ministerio de Cultura y Patrimonio del Ecuador, 2020).

El desarrollo y consolidación de esta tradición artesanal se encuentra estrechamente vinculados a la figura del artista Daniel Reyes y a la institucionalización de la formación artística local a partir de la fundación, en 1944, del Liceo Artístico que llevó su nombre. Este proceso dio origen posteriormente al Colegio de Artes en 1966 y al Instituto de Artes Plásticas Daniel Reyes en 1976, espacios formativos que permitieron la transmisión sistemática de conocimientos y destrezas en pintura, escultura y tallado en madera a varias generaciones de habitantes de la parroquia (García & Pereira, 2019). Como resultado, la producción artística y artesanal se consolidó como uno de los principales componentes de la identidad cultural de San Antonio de Ibarra, profundamente vinculada a las técnicas tradicionales de la Escuela Quiteña (GAD Parroquial San Antonio de Ibarra, 2019).

En reconocimiento de esta trayectoria, la parroquia recibió varias declaratorias oficiales. En primer lugar, en 2011, la Asamblea Nacional declaró a San Antonio de Ibarra Patrimonio Cultural y Artístico del Ecuador. Posteriormente, en 2020, la parroquia fue reconocida como Pueblo Mágico del Ecuador. Ese mismo año, las técnicas y conocimientos tradicionales del tallado en madera fueron incorporados a la Lista Representativa del Patrimonio Cultural Inmaterial del Ecuador (Asamblea Nacional del Ecuador, 2011; Ministerio de Cultura y Patrimonio del Ecuador, 2020).

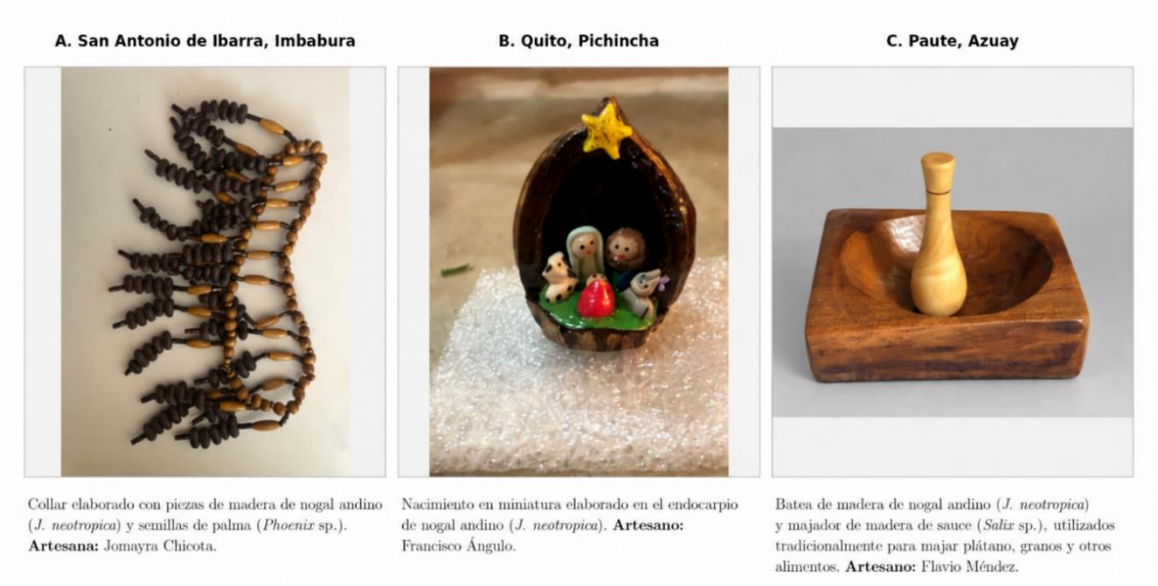
De manera complementaria, San Antonio de Ibarra ha sido un componente clave en el proceso que permitió a la provincia de Imbabura ser declarada Geoparque Mundial de la UNESCO el 17 de abril de 2018, constituyéndose en el primer sitio del Ecuador en alcanzar este reconocimiento. El enfoque del Geoparque, basado en la integración entre patrimonio geológico, biodiversidad, cultura y desarrollo local sostenible, proporciona un marco territorial que permite valorar especies nativas como *J. neotropica*, cuya historia se encuentra estrechamente vinculada al paisaje y a las prácticas culturales de la región.

La evolución histórica de la artesanía de San Antonio de Ibarra demuestra que *J. neotropica* trascendió su condición de recurso forestal para convertirse en un elemento inseparable de la identidad territorial. En este contexto, la conservación de la especie trasciende el abastecimiento de madera para el tallado artístico y contribuye a preservar un patrimonio cultural vivo que integra biodiversidad, conocimiento artesanal y desarrollo territorial sostenible (Bravo & Tabango, 2023).

Si bien San Antonio de Ibarra se ha consolidado como el principal referente del tallado artesanal en madera de nogal en Ecuador, el aprovechamiento de esta especie se extiende a otros territorios andinos. En ellos, la madera, los frutos y las semillas se utilizan en la elaboración de objetos utilitarios, ornamentales y artesanales, lo que evidencia formas diversas de conocimiento y aprovechamiento local. Estas manifestaciones amplían la dimensión territorial del patrimonio biocultural asociado a *J. neotropica* y muestran que, junto con los centros artesanales históricamente consolidados, persisten prácticas de menor escala vinculadas con la especie en diferentes regiones del país (Figura 3.1).

Figura 3.1

Artesanías elaboradas a partir de diferentes partes de Juglans neotropica en distintas localidades del Ecuador



3.3.2. Patrimonio gastronómico

El fruto de *J. neotropica*, conocido localmente como tocte, constituye el ingrediente principal de las nogadas, un dulce emblemático estrechamente vinculado con la identidad gastronómica de la ciudad de Ibarra. La elaboración de este producto forma parte de una tradición culinaria con más de un siglo de presencia en la ciudad y constituye una de las expresiones más representativas del patrimonio gastronómico de Imbabura (Aguinaga del Hierro, 2021; Albán, 2015; García & Mena, 2021).

De acuerdo con Ayala Mora (2020), la tradición dulcera imbabureña tiene sus raíces en recetas desarrolladas y perfeccionadas en los conventos durante la época colonial, las cuales fueron posteriormente incorporadas y adaptadas a la cocina local. En este contexto, las nogadas se consolidaron como una preparación característica de Ibarra, donde el empleo del tocte le confirió una identidad propia y un profundo significado cultural.

El aprovechamiento gastronómico del tocte, sin embargo, trasciende el ámbito ibarreño y presenta diversas expresiones en otros territorios de la Sierra ecuatoriana. En Pallatanga, provincia de Chimborazo, particularmente en el sector de Chayaguán, se registra la recolección del fruto y su utilización en la elaboración artesanal de nogadas y otros derivados. En Azuay, el tocte forma parte de prácticas alimentarias tradicionales que incluyen su consumo directo o acompañado de mote y panela, así como su incorporación en melcochas, nogadas y productos de repostería. Estos usos poseen además una importante profundidad histórica: Estrella (1990) documenta al tocte como un alimento de origen indígena asociado a la región interandina y recoge antecedentes de su aprovechamiento alimentario desde épocas prehispánicas y coloniales. A estas expresiones se suma el consumo y comercialización actual de la nuez andina en otras

localidades productoras, como Cahuasquí, en Imbabura. En conjunto, esta diversidad de preparaciones y formas de consumo evidencia que el valor gastronómico de *J. neotropica*, aunque adquiere una expresión particularmente emblemática en las nogadas de Ibarra, forma parte de un patrimonio alimentario de alcance más amplio en los Andes ecuatorianos.

3.3.3. El nogal como fuente de tintes tradicionales

El uso de tintes naturales obtenidos de *J. neotropica* constituye una práctica tradicional documentada en diversas comunidades andinas del Ecuador, donde las hojas y las cáscaras del fruto han sido empleadas para obtener tonalidades marrones utilizadas principalmente en el teñido de fibras naturales (Montalvo, 2017; Montalvo & Cerón, 2003). Este conocimiento forma parte del patrimonio etnobotánico asociado al aprovechamiento sostenible de los productos forestales no maderables y refleja la estrecha relación entre las comunidades locales y la biodiversidad nativa.

Entre las experiencias mejor documentadas destacan las prácticas de las comunidades indígenas de Salasaka, en la provincia de Tungurahua, donde las técnicas tradicionales de tintura textil continúan siendo transmitidas entre generaciones. Los procesos de extracción y aplicación de los colorantes vegetales forman parte del conocimiento de artesanos, taitas y sabios de la comunidad, quienes reconocen estos tintes como un componente de su identidad cultural y una fuente histórica de sustento económico (Aldas et al., 2025).

De manera similar, en la comunidad de Santa Rosa, provincia de Imbabura, las mujeres conservan el conocimiento tradicional sobre el empleo de hojas maduras de *J. neotropica* para el teñido de fibras de cabuya (*Furcraea andina*), utilizadas posteriormente en la elaboración de artesanías y elementos de vestimenta. La intensidad de la coloración depende del tiempo de inmersión y de la combinación del nogal con otras especies vegetales, permitiendo obtener tonalidades que varían desde café claro y marrón hasta café oscuro y azul oscuro (Figura 3.2).

Figura 3.2

Tonalidades obtenidas mediante el teñido natural de fibras de cabuya (Furcraea andina) utilizando hojas de Juglans neotropica y otras especies vegetales empleadas por las mujeres de la comunidad de Santa Rosa, Imbabura, Ecuador

Nota. **(1)** Fibra teñida con hojas maduras de *J. neotropica* durante 20 min (café claro). **(2)** Fibra teñida con hojas maduras de *J. neotropica* durante 24 h (marrón). **(3)** Fibra teñida con hojas de *J. neotropica* y *Weinmannia pinnata* durante 24 h (café oscuro). **(4)** Fibra teñida con hojas de *J. neotropica* y *Coriaria ruscifolia* durante 24 h (azul oscuro). Fotografía: Jessica Tabango.

En la parroquia Plaza Gutiérrez, cantón Cotacachi, provincia de Imbabura, el empleo de tintes vegetales se encuentra estrechamente relacionado con la elaboración artesanal de productos de cabuya (*Furcraea andina*). Investigaciones desarrolladas por la Universidad Técnica del Norte documentaron, mediante metodologías participativas, los conocimientos locales sobre las especies tintóreas, las técnicas de recolección y procesamiento del material vegetal y su utilización en el teñido de la fibra destinada posteriormente a la elaboración de artesanías (González Pepinós, 2018; Jima Chugá, 2017).

Entre las especies utilizadas destaca *J. neotropica*. El proceso documentado comprende la recolección del material vegetal, la extracción del colorante mediante cocción, la inmersión de la fibra de cabuya en el extracto, su posterior lavado y secado y, finalmente, la preparación y transformación de la fibra teñida en productos artesanales. Esta secuencia integra conocimientos tradicionales sobre las propiedades tintóreas de las plantas con técnicas artesanales transmitidas y adaptadas localmente, y vincula el aprovechamiento de productos forestales no maderables con la generación de valor

agregado y la economía de las familias artesanas de Plaza Gutiérrez (González Pepinós, 2018) (Figura 3.3).

Figura 3.3

Proceso artesanal de obtención de tintes naturales de Juglans neotropica y elaboración de artesanías con fibra de cabuya (Furcraea andina) en Plaza Gutiérrez, Cotacachi, Imbabura

El aprovechamiento tintóreo del nogal también se encuentra documentado en el sur del Ecuador. En Gualaceo, provincia del Azuay, particularmente en las comunidades de Bullcay y Bullzhún, derivados del fruto del nogal han sido utilizados para obtener colorantes naturales empleados en el teñido de hilos de algodón destinados a la elaboración de macanas mediante la técnica tradicional del ikat. El uso de estos colorantes permite obtener tonalidades marrones, cafés y oscuras, integrándose en una práctica textil de profundo significado cultural en este territorio.

En conjunto, las experiencias documentadas en Tungurahua, Imbabura y Azuay muestran que el empleo de *J. neotropica* como fuente de tintes naturales forma parte de sistemas de conocimiento tradicional presentes en diferentes territorios andinos del Ecuador. Estas prácticas articulan el conocimiento de las propiedades tintóreas de la flora nativa con la transformación de fibras y la elaboración de productos artesanales, y constituyen además una oportunidad para fortalecer iniciativas de bioeconomía local basadas en productos forestales no maderables, contribuyendo simultáneamente a la valorización del patrimonio biocultural y de *J. neotropica* como especie multipropósito.

3.3.4. La Ruta del Nogal como estrategia de valorización del patrimonio biocultural

La Ruta del Nogal en Imbabura constituye una propuesta de interpretación y valorización del patrimonio biocultural asociado a *J. neotropica*, integrando en un mismo

recorrido la historia ambiental, las expresiones culturales y los saberes tradicionales vinculados a esta especie. Más que un itinerario turístico, representa una estrategia para fortalecer la identidad territorial mediante la articulación entre biodiversidad, patrimonio cultural y desarrollo local sostenible.

La ruta conecta diversos espacios representativos de la provincia donde el nogal ha desempeñado un papel relevante en la construcción del paisaje cultural. Entre ellos destacan los talleres de talla en madera de San Antonio de Ibarra, donde la tradición escultórica constituye una de las principales manifestaciones del patrimonio cultural ecuatoriano; los espacios gastronómicos tradicionales de Ibarra, donde las nueces del nogal forman parte de la elaboración de las emblemáticas nogadas; y las comunidades rurales que conservan conocimientos ancestrales sobre el uso de tintes naturales obtenidos de las hojas de *J. neotropica*, aplicados en el teñido artesanal de fibras vegetales.

Como parte de este recorrido, la antigua Fábrica Textil Imbabura, ubicada en la parroquia Andrade Marín del cantón Antonio Ante y actualmente convertida en museo industrial, aporta un importante componente histórico al evidenciar la evolución de la actividad textil en el norte del Ecuador y su relación con los saberes tradicionales asociados al uso de fibras y colorantes naturales. De esta manera, la ruta establece un vínculo entre el patrimonio industrial, la cultura local y el conocimiento tradicional de las comunidades andinas.

Desde esta perspectiva, la Ruta del Nogal trasciende la promoción turística convencional y se consolida como una herramienta de educación patrimonial, interpretación ambiental y conservación participativa. Al integrar paisajes forestales, prácticas culturales y conocimientos locales, contribuye a fortalecer la valoración social de *J. neotropica* y pone de manifiesto que la conservación de la especie implica también la preservación de la memoria histórica, los saberes tradicionales y la identidad cultural de los territorios andinos.

3.4. Sociedad, conocimiento tradicional y etnociencias asociadas a *J. neotropica*

La relación entre las sociedades humanas y los árboles ha contribuido a modelar los paisajes, las economías y las identidades culturales a lo largo de la historia (Tegel et al., 2012). En este contexto, *J. neotropica* constituye una especie emblemática de los Andes ecuatorianos, cuya importancia trasciende su valor forestal para integrarse al patrimonio biocultural de numerosas comunidades. Comprender la forma en que la sociedad percibe, utiliza y transmite el conocimiento asociado al nogal permite reconocer su papel como recurso ecológico, cultural y productivo, así como identificar oportunidades para fortalecer su conservación y manejo sostenible.

3.4.1. Percepciones sociales sobre el nogal andino

Las percepciones sociales constituyen un componente fundamental para comprender la relación entre las comunidades y los recursos forestales, ya que reflejan la importancia que las personas atribuyen a las especies según sus experiencias, necesidades y valores culturales (Caballero-Serrano et al., 2019).

Con el propósito de conocer esta relación en el norte del Ecuador, Sono et al. (2024) evaluaron la percepción social sobre *J. neotropica* mediante encuestas aplicadas a 161 habitantes de las parroquias San Antonio de Ibarra y San Francisco de Natabuela. Los resultados evidenciaron que los usos maderables continúan siendo los más valorados, destacando el tallado artístico (72,72 %), seguido de la ebanistería (53,59 %) y la fabricación de muebles (52,49 %). Entre los usos no maderables sobresalieron el consumo de las nueces, los valores ornamentales y los usos medicinales tradicionales.

Los análisis estadísticos también mostraron una elevada coherencia entre las diferentes categorías de uso, reflejada en correlaciones significativas entre las variables evaluadas. En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que la percepción social del nogal no se limita a su aprovechamiento como recurso forestal, sino que incorpora dimensiones culturales, históricas y simbólicas estrechamente relacionadas con la identidad de las comunidades andinas (Sono et al., 2024).

3.4.2. Diferencias socioculturales en la valoración de la especie

La valoración de las plantas útiles puede variar según el género, la edad, las actividades productivas y el contexto sociocultural de las comunidades, como ha sido documentado en estudios etnobotánicos realizados en Ecuador (Caballero-Serrano et al., 2019). Estos antecedentes constituyen un marco útil para interpretar la diversidad de relaciones que las sociedades establecen con los recursos vegetales.

En el caso específico de *J. neotropica*, la evidencia disponible muestra una diversidad de valoraciones asociadas con la madera, los frutos, los usos medicinales, la ornamentación y las prácticas culturales (Sono et al., 2024). Sin embargo, los estudios considerados en este capítulo no permiten generalizar cuantitativamente diferencias de valoración por género, edad o pertenencia cultural para la especie. Tales relaciones requieren investigaciones comparativas diseñadas específicamente para evaluar esos factores.

Esta cautela no reduce la importancia del componente sociocultural; por el contrario, pone de manifiesto la necesidad de incorporar variables sociales y culturales en futuras investigaciones sobre percepción, conocimiento tradicional y conservación de *J. neotropica*.

3.4.3. Etnociencias asociadas al nogal

Las etnociencias constituyen un conjunto de disciplinas que estudian el conocimiento desarrollado por las comunidades sobre la naturaleza y sus formas de aprovechamiento. En el caso de *J. neotropica*, la etnobotánica, la etnomedicina, los conocimientos etnoalimentarios y otras áreas del conocimiento tradicional permiten comprender la estrecha relación existente entre la especie y las poblaciones andinas (Rojas et al., 2024).

Desde la perspectiva etnobotánica, *J. neotropica* presenta una reconocida importancia cultural y diversidad de usos en comunidades del Ecuador. En la comunidad El Tundo, provincia de Loja, Maza et al. (2021) registraron el mayor Índice de Valor de Uso (IVU = 1,47) y el mayor Nivel de Uso Significativo TRAMIL (UST = 83,33 %) entre

las especies evaluadas, evidenciando el amplio reconocimiento social y la diversidad de aplicaciones atribuidas a la especie en esta localidad. Asimismo, Rivero-Guerra (2021) identificó a *J. neotropica* entre las especies con mayor frecuencia relativa de uso medicinal dentro del conocimiento tradicional ecuatoriano.

En el ámbito de la etnomedicina, diferentes partes de la planta, especialmente las hojas, han sido utilizadas tradicionalmente para el tratamiento de afecciones cutáneas, procesos inflamatorios y otras dolencias. Estas prácticas forman parte de sistemas más amplios de conocimiento tradicional en los Andes ecuatorianos, donde las plantas medicinales desempeñan un papel relevante en rituales de limpia y otras prácticas de medicina tradicional (Saavedra Quezada & Bernal Sarmiento, 2023). En un estudio realizado en Perú, Rondinel Valenzuela (2018) reportó la presencia de compuestos fenólicos, flavonoides y taninos en *J. neotropica*, así como actividad biológica asociada a estos constituyentes. Estos resultados aportan evidencia fitoquímica de interés para el estudio de los usos medicinales tradicionalmente atribuidos a la especie.

En el ámbito de los conocimientos etnoalimentarios, las nueces de *J. neotropica* forman parte de preparaciones tradicionales como las nogadas de Ibarra, producto vinculado con la historia y la identidad gastronómica local (Albán, 2015). Otros conocimientos tradicionales se relacionan con el empleo de la especie en la obtención de tintes naturales mediante prácticas artesanales y técnicas ancestrales (Aldas et al., 2025).

3.4.4. Conservación del conocimiento tradicional

El conocimiento tradicional asociado a *J. neotropica* constituye un patrimonio dinámico que ha sido transmitido de generación en generación mediante la práctica cotidiana, la tradición oral y la experiencia comunitaria. Sin embargo, diversos estudios advierten que estos saberes enfrentan actualmente un proceso progresivo de erosión.

En la comunidad El Tundo, Maza et al. (2021) observaron que algunos usos tradicionales del nogal han disminuido debido al reemplazo por productos comerciales, evidenciando cambios en las formas de aprovechamiento de la especie. De manera similar, Estrella López et al. (2020) documentaron en comunidades indígenas de Saraguro un amplio conocimiento sobre los usos alimenticios y medicinales del nogal, aunque señalaron la necesidad de fortalecer su transmisión entre las nuevas generaciones.

Una revisión sistemática realizada por Barrionuevo & Ramírez (2025) identifica como principales factores de pérdida del conocimiento ancestral la globalización, la migración, la urbanización, la expansión de actividades extractivas, el cambio climático y la creciente influencia de modelos educativos desvinculados de los saberes locales. Como consecuencia, se produce un debilitamiento de la identidad cultural y de las prácticas tradicionales relacionadas con la biodiversidad.

Frente a este escenario, la conservación de *J. neotropica* debe concebirse desde un enfoque biocultural, donde la protección de la especie avance de manera paralela a la salvaguardia del conocimiento tradicional que sustenta su aprovechamiento. El fortalecimiento de la educación intercultural, la investigación participativa y la transmisión intergeneracional de saberes representan estrategias fundamentales para

garantizar la permanencia del nogal andino como patrimonio natural y cultural de los Andes ecuatorianos.

3.4.5. Memoria oral y transmisión intergeneracional del conocimiento: el nogal en Natabuela

Además de los conocimientos documentados mediante estudios etnobotánicos y etnomedicinales, *J. neotropica* forma parte de una memoria colectiva que permanece viva en numerosas comunidades andinas. Estos saberes cotidianos, transmitidos principalmente por tradición oral, constituyen una expresión del patrimonio cultural inmaterial asociado a la especie y complementan la información obtenida mediante la investigación científica. El siguiente registro etnográfico fue documentado en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), desarrollado por la Universidad Técnica del Norte sobre la conservación, el manejo y el patrimonio biocultural del nogal, a partir de entrevistas y de la recopilación sistemática de memoria oral en la parroquia San Francisco de Natabuela (Imbabura). Este testimonio se incorpora como una fuente primaria de carácter etnográfico, cuyo propósito es ilustrar la dimensión social y cultural que el nogal ha tenido en la vida cotidiana de las comunidades rurales, sin pretender constituir un registro histórico documental.

En la parroquia San Francisco de Natabuela, el nogal o tocte *J. neotropica* ha formado parte no solo del paisaje rural, sino también de la vida cotidiana de las familias. Entre las prácticas tradicionales más recordadas se encontraba el acto de «golpear» o «quebrar toctes», expresión local utilizada para describir la apertura manual de los frutos con el fin de extraer las nueces. Esta actividad trascendía su finalidad alimentaria y se convertía en un espacio de encuentro familiar, conversación y transmisión de conocimientos entre generaciones.

La abundancia de nogales, muchos utilizados como cercas vivas o linderos de las propiedades, hacía que esta práctica fuera frecuente. Sin embargo, adquiría un significado especial los domingos por la tarde, cuando varias generaciones de una misma familia se reunían alrededor de un costal de toctes secos. Mientras una persona experimentada quebraba los frutos utilizando dos piedras o un martillo, el resto compartía las nueces acompañadas de maíz tostado preparado en tiesto de barro y trozos de panela. En ese ambiente cotidiano se fortalecían los vínculos familiares y se transmitían relatos, experiencias y conocimientos comunitarios.

Desde la década de 1980, la disminución de los árboles de nogal, asociada a la extracción de madera y a los cambios en el uso del suelo, junto con las transformaciones en los hábitos alimentarios y en las formas de convivencia familiar, contribuyó al progresivo abandono de esta práctica. Las reuniones familiares dominicales se hicieron menos frecuentes y muchas de las experiencias compartidas alrededor del nogal dejaron de formar parte de la vida cotidiana.

Este testimonio evidencia que el valor de *J. neotropica* trasciende su importancia ecológica y productiva. El nogal constituye también un elemento de memoria biocultural que refleja formas tradicionales de convivencia, transmisión intergeneracional del conocimiento y construcción de identidad comunitaria. Estos registros enriquecen la comprensión de la relación histórica entre las comunidades andinas y la especie,

incorporando dimensiones culturales que difícilmente pueden documentarse mediante fuentes históricas convencionales.

3.5. Perspectivas para la conservación del patrimonio biocultural de *J. neotropica*

La revisión histórica, ecológica y sociocultural presentada en este capítulo evidencia que *J. neotropica* constituye mucho más que una especie forestal nativa de los Andes ecuatorianos. Su permanencia en los paisajes rurales, su vinculación con la artesanía, la gastronomía, los conocimientos tradicionales y la memoria colectiva de numerosas comunidades demuestran que el nogal representa un patrimonio biocultural construido mediante la interacción continua entre la naturaleza y la sociedad.

Sin embargo, este patrimonio enfrenta importantes desafíos. La reducción de las poblaciones naturales como consecuencia de la fragmentación de los bosques andinos, la expansión de la frontera agrícola, la extracción selectiva de madera y los efectos del cambio climático se suman a la progresiva pérdida del conocimiento tradicional ocasionada por los procesos de urbanización, migración y cambios socioculturales. En conjunto, estos factores comprometen tanto la conservación de la especie como la permanencia de los saberes y prácticas que históricamente han acompañado su manejo y aprovechamiento. La condición de amenaza de la especie hace prioritarias las estrategias de conservación *in situ* y *ex situ* (CABI, 2022).

Frente a este escenario, la conservación de *J. neotropica* requiere un enfoque integral que trascienda las acciones orientadas exclusivamente a proteger los individuos o los remanentes boscosos. Resulta necesario fortalecer la restauración de paisajes forestales, promover sistemas agroforestales con especies nativas, conservar la diversidad genética de las poblaciones naturales y fomentar el uso sostenible de sus productos maderables y no maderables. Paralelamente, es indispensable salvaguardar el conocimiento tradicional mediante procesos de educación intercultural, investigación participativa y transmisión intergeneracional de saberes, reconociendo a las comunidades locales como actores fundamentales en la conservación del patrimonio biocultural.

En este contexto, el desarrollo científico y tecnológico ofrece nuevas oportunidades para fortalecer el manejo y la conservación del nogal andino. Los avances en biotecnología, genética forestal, propagación vegetal, teledetección, análisis espacial e inteligencia artificial permitirán mejorar la producción de material vegetal, evaluar la variabilidad genética, monitorear el estado de las poblaciones naturales, modelar escenarios de cambio climático y optimizar las decisiones de manejo forestal. Estas herramientas, sin embargo, deben entenderse como un complemento del conocimiento ecológico tradicional y no como un sustituto de la experiencia acumulada por las comunidades que han convivido históricamente con la especie.

El futuro de *J. neotropica* dependerá de la capacidad para integrar investigación científica, políticas públicas, gestión forestal y participación comunitaria dentro de una estrategia común de conservación. La articulación entre universidades, instituciones gubernamentales, gobiernos autónomos descentralizados, organizaciones sociales y comunidades locales permitirá consolidar programas de restauración, investigación y aprovechamiento sostenible que aseguren la permanencia de la especie y de los servicios ecosistémicos que proporciona.

En síntesis, la conservación del nogal andino no debe entenderse únicamente como la protección de un recurso forestal, sino como la preservación de un patrimonio biocultural que integra biodiversidad, historia, identidad territorial y conocimiento tradicional. Este enfoque constituye el principal desafío y, al mismo tiempo, la mayor oportunidad para garantizar que *J. neotropica* continúe desempeñando un papel relevante en los paisajes andinos del Ecuador y en las estrategias nacionales de restauración, bioeconomía y desarrollo sostenible.

CAPÍTULO 4

Botánica, filogenia y evolución de *Juglans neotropica*

Capítulo

4

Botánica, filogenia y evolución de *Juglans neotropica*

Rama con hojas y frutos de *J. neotropica* en Cahuasquí, Imbabura, Ecuador. Fotografía: Mario Añazco.

La comprensión de la biología de *Juglans neotropica* Diels requiere integrar la evidencia **taxonómica, morfológica, filogenética y genética** disponible con observaciones de campo obtenidas en poblaciones naturales y plantaciones establecidas en los Andes ecuatorianos. Mientras la botánica proporciona los caracteres que permiten reconocer e identificar la especie, la filogenia y la filogenómica permiten comprender su origen evolutivo, sus relaciones con otras especies del género *Juglans*, los procesos históricos que condujeron a su diferenciación en los Andes tropicales y las bases genéticas que sustentan su conservación.

En este capítulo se sintetiza el conocimiento científico más relevante sobre la **botánica, filogenia, evolución y diversidad genética molecular** de *J. neotropica*, integrando literatura taxonómica clásica con estudios filogenómicos recientes. Asimismo, se diferencian explícitamente las descripciones obtenidas de la bibliografía especializada de aquellas derivadas de observaciones originales realizadas durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), desarrollado por la Universidad Técnica del Norte en poblaciones establecidas en el Campus Yuyucocha (Imbabura). Finalmente, se analizan las implicaciones evolutivas y de conservación derivadas del conocimiento filogenético y genético disponible para la especie.

4.1. Botánica

La botánica constituye la base para la identificación, clasificación y comprensión de la diversidad biológica de las especies vegetales. En *J. neotropica*, el estudio botánico permite reconocer los caracteres diagnósticos que diferencian esta especie de otros representantes del género *Juglans*, así como interpretar las adaptaciones morfológicas que favorecen su desarrollo en los bosques montanos andinos. En esta sección se presentan la etimología, clasificación taxonómica, sinonimia, nombres comunes y principales características morfológicas de la especie, integrando información proveniente de literatura especializada con observaciones originales obtenidas durante el Programa de Investigación *Juglans.*

4.1.1. Etimología del género *Juglans*

El nombre del género *Juglans* deriva del latín *Jūglans*, contracción de *Jōvis glāns*, cuyo significado literal es "la nuez de Júpiter". Esta denominación refleja el elevado valor que las culturas clásicas atribuían al fruto del nogal, considerado digno de la principal deidad del panteón romano. El término *glans* significa bellota o nuez, mientras que *Jovis* corresponde al genitivo de *Jupiter* (Quattrocchi, 2012).

El género fue incorporado formalmente a la nomenclatura botánica moderna por Carl Linnaeus en *Species Plantarum*, obra que estableció las bases de la taxonomía vegetal contemporánea (Linnaeus, 1753). Desde entonces, *Juglans* ha mantenido una identidad taxonómica estable, asociada a árboles productores de frutos secos y maderas de elevado valor económico.

El epíteto específico **neotropica**, asignado por Friedrich Ludwig Emil Diels en 1906, hace referencia a la distribución natural de la especie en la región Neotropical, diferenciándola de los nogales templados del hemisferio norte (Diels, 1906). En los Andes ecuatorianos, la especie es ampliamente conocida como nogal o tocte, denominaciones

que reflejan su estrecha relación con las comunidades rurales y su importancia histórica dentro de los sistemas agroforestales y forestales.

4.1.2. Taxonomía de *J. neotropica*

J. neotropica pertenece a la familia Juglandaceae, grupo que reúne especies arbóreas reconocidas por la producción de nueces y por la alta calidad tecnológica de su madera. Dentro del género *Juglans*, constituye la especie representativa de los Andes tropicales y uno de los pocos nogales nativos de América del Sur.

La clasificación taxonómica de *J. neotropica* se resume en la Tabla 4.1, con base en fuentes taxonómicas y florísticas de referencia.

Tabla 4.1

Clasificación taxonómica de Juglans neotropica

Categoría	Clasificación
Dominio	Eukaryota
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Fagales
Familia	Juglandaceae
Subfamilia	Juglandoideae
Tribu	Juglandeae
Género	*Juglans*
Especie	*Juglans neotropica* Diels

Nota. Clasificación taxonómica adaptada de Romoleroux (2004), Plants of the World Online (POWO, 2024) y World Flora Online (WFO, 2026).

4.1.3. Sinonimia y consideraciones taxonómicas

La historia taxonómica de *J. neotropica* refleja las dificultades que tradicionalmente ha presentado la delimitación de especies dentro del género *Juglans*. Las variaciones morfológicas observadas entre poblaciones andinas condujeron durante el siglo XX a la descripción independiente de diversos morfotipos, posteriormente reconocidos como sinónimos taxonómicos.

Los estudios morfológicos clásicos (Manning, 1957; Manning, 1960) y, posteriormente, las investigaciones basadas en marcadores moleculares (Aradhya et al., 2007) demostraron que estas denominaciones corresponden a una misma entidad biológica. En consecuencia, las bases de datos taxonómicas internacionales reconocen actualmente a ***Juglans neotropica*** **Diels** como el nombre aceptado para la especie (POWO, 2024; WFO, 2026).

La correcta aplicación de la nomenclatura posee implicaciones que trascienden el ámbito taxonómico. Una identificación precisa resulta indispensable para los programas de conservación genética, restauración ecológica, comercio internacional de

germoplasma y planificación silvicultural, evitando confusiones entre especies nativas y especies introducidas del género *Juglans* (FAO, 2021; Woeste y Michler, 2011).

Los principales sinónimos utilizados históricamente se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2

Principales sinónimos botánicos asociados a Juglans neotropica

Nombre histórico	Situación actual
Juglans andina	Sinónimo
Juglans colombiensis	Sinónimo
Juglans honorei	Sinónimo
Juglans peruviana	Sinónimo

Nota. Sinónimos botánicos registrados para *J. neotropica* según Manning (1957), Romoleroux (2004), POWO (2024) y WFO (2026).

4.1.4. El género *Juglans* y las principales especies

El género *Juglans* comprende aproximadamente entre 20 y 25 especies distribuidas en Asia, Europa y América, agrupadas filogenéticamente en cuatro secciones principales. Esta diversificación refleja una prolongada historia evolutiva asociada a procesos de dispersión, aislamiento geográfico y adaptación a diferentes condiciones climáticas.

Entre ellas, *J. regia* constituye la especie de mayor importancia agrícola por la producción comercial de nueces; *J. nigra* destaca por la calidad de su madera en Norteamérica; mientras que *J. neotropica* representa el principal linaje de nogales adaptado a los bosques montanos tropicales de los Andes (Aradhya et al., 2007; Woeste & Michler, 2011).

Las principales especies del género se resumen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3

Especies representativas del género Juglans, distribución y sección filogenética

Especie	Distribución principal	Sección filogenética
J. regia	Europa y Asia	Dioscaryon
J. nigra	Norteamérica	Rhysocaryon
J. cinerea	Norteamérica	Trachycaryon
J. neotropica	Andes tropicales	Rhysocaryon

Nota. Distribución y clasificación en secciones filogenéticas sintetizadas a partir de Aradhya et al. (2007) y Woeste y Michler (2011).

4.1.5. Nombres comunes

Los nombres comunes de *J. neotropica* reflejan la diversidad cultural y lingüística de los países andinos donde la especie se distribuye naturalmente. Aunque existen denominaciones regionales particulares, los nombres **nogal andino**, **nogal criollo** y **nogal** son los más ampliamente utilizados en el ámbito técnico y científico. En Ecuador, el nombre **tocte**, de origen kichwa, constituye una de las denominaciones tradicionales más difundidas en las comunidades rurales andinas (Lojan, 1992). Durante los recorridos de campo realizados en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), también se registró el uso local de las denominaciones **togte** y **tukti** en algunas comunidades.

Las principales denominaciones regionales se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4

Nombres comunes de Juglans neotropica en su área de distribución

País	Principales nombres comunes
Venezuela	Nogal, nogal andino, nogal criollo.
Colombia	Nogal, nogal colombiano, cedro nogal, cedro negro.
Ecuador	Nogal, nogal andino, nogal criollo, tocte, togte, tukti.
Perú	Nogal andino, nogal peruano.

Nota. Nombres comunes recopilados de (Jørgensen & León-Yánez, 1999; Manning, 1957; Palacios, 2016; Romoleroux, 2004). En Ecuador, **togte** y **tukti** corresponden a variantes fonéticas locales de **tocte**, registradas oralmente durante recorridos de campo realizados en distintas comunidades en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

4.1.6. Morfología de *J. neotropica*

La caracterización morfológica presentada en este capítulo integra la evidencia botánica disponible para *J. neotropica* (Jørgensen & León-Yánez, 1999; Manning, 1957; Palacios, 2016; Romoleroux, 2004) con observaciones originales obtenidas durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), desarrollado por la Universidad Técnica del Norte, permitiendo contrastar las descripciones clásicas con información empírica generada bajo condiciones naturales y de plantación en Ecuador.

Las observaciones de campo fueron realizadas en individuos establecidos en el Campus Yuyucocha (Imbabura) (Figura 4.1), complementadas con registros obtenidos en el Parque Universitario Francisco Vivar Castro de la Universidad Nacional de Loja. Las características morfológicas descritas fueron contrastadas con especímenes observados en poblaciones naturales y plantaciones distribuidas en 14 provincias del Ecuador, recorridas durante el desarrollo del Programa *Juglans*.

Figura 4.1

Aspecto general de la morfología de Juglans neotropica durante la fructificación

Nota. Se observan hojas compuestas imparipinnadas y frutos maduros, órganos vegetativos y reproductivos característicos de la especie.

Raíz

J. neotropica desarrolla un sistema radical pivotante profundo, acompañado de raíces laterales bien ramificadas, lo que le confiere una elevada capacidad de anclaje y una eficiente exploración del perfil edáfico. Este tipo de sistema radical es característico del género *Juglans* y favorece su establecimiento en suelos bien drenados de zonas montañosas, contribuyendo a la estabilidad del suelo y a la tolerancia frente a periodos cortos de déficit hídrico (Gentry, 1996; Manning, 1957).

Tallo

El fuste o tronco es recto, cilíndrico y con buena dominancia apical, alcanzando alturas de 25–48 m y diámetros de hasta 120 cm en individuos adultos (Figura 4.2). En plantaciones manejadas, los árboles presentan un fuste limpio de ramas hasta 10–15 m, mientras que en bosques naturales el crecimiento puede ser más irregular debido a la competencia por la luz y el espacio (Manning, 1960; Reyes, 2024).

En los individuos evaluados durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) se registraron alturas comprendidas entre **25,0 m** en Imbabura y **33,7 m** en la

localidad de El Tundo, provincia de **Loja**, valores que se encuentran dentro del rango descrito para la especie en la literatura especializada.

Figura 4.2

Árbol de Juglans neotropica de 32 años con fuste recto, cilíndrico y con buena dominancia apical, en el Campus Yuyucocha, Imbabura

Validación arquitectónica de *J. neotropica* según el modelo de Rauh

La arquitectura arbórea constituye uno de los atributos más importantes para comprender la organización estructural, el crecimiento y la adaptación ecológica de las especies forestales. Los modelos arquitectónicos propuestos por Hallé et al.(1978) representan una herramienta ampliamente utilizada para interpretar los patrones de desarrollo de los árboles tropicales, permitiendo relacionar la morfología de la copa con procesos fisiológicos, ecológicos y silviculturales.

Con el propósito de validar la arquitectura de *J. neotropica*, se desarrolló un análisis original en el marco del **Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026)** de la Universidad Técnica del Norte. La evaluación comprendió **25 árboles de diferentes edades** establecidos en el Campus Yuyucocha (Imbabura), seleccionados por representar distintas fases del desarrollo ontogénico de la especie.

La asignación al modelo arquitectónico de Rauh se realizó mediante un enfoque comparativo, contrastando las características observadas en campo con los criterios

diagnósticos establecidos por Hallé et al. (1978), ampliamente utilizados en estudios de arquitectura arbórea tropical (Tabla 4.5).

Tabla 4.5

Validación de la arquitectura de Juglans neotropica según los caracteres diagnósticos del modelo de Rauh

Caracter diagnóstico	Observación en campo de *J. neotropica*	Cumple modelo Rauh
Dominancia apical	**Sí**	✓
Crecimiento monopodial	**Sí**	✓
Persistencia del eje	**Sí**	✓
Ramificación plagiotrópica	**Sí**	✓
Copa estratificada	**Sí**	✓

Nota. La validación se realizó mediante la evaluación de 25 árboles de *J. neotropica* de diferentes edades establecidos en el Campus Yuyucocha, Imbabura, Ecuador. Los caracteres arquitectónicos observados en campo se contrastaron con los criterios diagnósticos del modelo de Rauh descrito por Hallé et al. (1978). Evaluación realizada en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), Universidad Técnica del Norte.

Con el fin de verificar la consistencia del patrón arquitectónico a escala nacional, las observaciones obtenidas en el Campus Yuyucocha fueron contrastadas con registros fotográficos de individuos provenientes de poblaciones naturales, plantaciones forestales y sistemas agroforestales distribuidos en catorce provincias del Ecuador (Imbabura, Loja, Pichincha, El Oro, Azuay, Cañar, Chimborazo, Tungurahua, Bolívar, Cotopaxi, Carchi, Napo, Zamora Chinchipe y Santo Domingo de los Tsáchilas), obtenidos durante las expediciones realizadas por el Programa *Juglans*.

Como procedimiento adicional de validación, estudiantes de la carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Técnica del Norte elaboraron representaciones gráficas de los árboles evaluados, comparando la arquitectura observada directamente en campo con su interpretación mediante dibujo técnico. Este ejercicio permitió verificar la correspondencia entre la estructura real de los individuos y su representación arquitectónica, reduciendo posibles sesgos de interpretación y fortaleciendo la consistencia del análisis morfológico.

Los cinco caracteres diagnósticos fueron observados de manera consistente en todos los individuos evaluados, independientemente de la edad, condición silvicultural o sistema de manejo. Asimismo, las fotografías obtenidas en las diferentes provincias evidenciaron una notable estabilidad del patrón arquitectónico, lo que permitió asignar de manera consistente a *J. neotropica* al **modelo arquitectónico de Rauh**.

Este modelo se caracteriza por presentar un eje principal persistente con crecimiento monopodial, dominancia apical bien definida y ramas primarias plagiotrópicas dispuestas de manera rítmica, configurando una copa amplia y estratificada (Figura 4.3). Estas características explican la elevada rectitud del fuste, la estabilidad estructural de la copa y la capacidad de la especie para desarrollarse tanto en bosques montanos como en plantaciones forestales y sistemas agroforestales de los Andes ecuatorianos.

Figura 4.3

Fuste y ramificación de un árbol adulto de Juglans neotropica

Nota. Vista desde la base del tronco que permite apreciar el fuste principal y la disposición de las ramas en la copa. Valladolid, Zamora Chinchipe, Ecuador. Crédito Fotografía: Augusto Pinzón.

La evaluación realizada aporta una caracterización arquitectónica de *J. neotropica* sustentada en observaciones de campo y en registros de individuos procedentes de diferentes localidades del Ecuador. Esta evidencia complementa las descripciones botánicas disponibles para la especie y fortalece su interpretación desde una perspectiva morfofuncional.

Copa

La copa es amplia e irregular, con ramas primarias casi horizontales y ramificación secundaria bien distribuida. En individuos adultos, la copa adquiere una estructura abierta que permite una buena penetración de la luz, favoreciendo el desarrollo del follaje y la producción reproductiva (Figura 4.4). Esta arquitectura es típica de *Juglans* en ambientes andinos y ha sido ampliamente documentada en descripciones dendrológicas del género (Gentry, 1996; Manning, 1957).

Figura 4.4

Copa de un árbol adulto de Juglans neotropica

Nota. Se observa una copa amplia e irregular con ramas primarias de disposición subhorizontal y ramificación secundaria bien distribuida, características propias de individuos adultos establecidos en ambientes abiertos. Fotografía tomada en el Campus Miguel de Cervantes, Universidad Internacional SEK (Quito).

Corteza

La corteza es pardo-grisácea a pardo oscura, inicialmente lisa en individuos jóvenes y progresivamente fisurada con la edad (Figura 4.5). Presenta lenticelas visibles

en ramas jóvenes, las cuales facilitan el intercambio gaseoso. En árboles maduros, la corteza desarrolla surcos longitudinales poco profundos, rasgo común en especies de *Juglans* de zonas templadas y tropicales (Jørgensen & León-Yánez, 1999; Romoleroux, 2004).

Figura 4.5

Corteza joven (izquierda) y corteza madura (derecha) de Juglans neotropica

Hojas

Las hojas son compuestas imparipinnadas y de disposición alterna. El raquis presenta pubescencia en su base, con pelos glandulares rojizos y algunos pelos fasciculados, mientras que hacia la parte terminal puede ser glabro. Los foliolos, entre 11 y 19, son opuestos o subopuestos, ovados, ovado-oblongos u ovado-lanceolados, sésiles o subsésiles, con base redondeada, ápice acuminado, margen aserrado, haz glabro y envés pubescente principalmente sobre las nervaduras (Palacios, 2011; Palacios, 2016).

Observaciones del Programa *Juglans*. Las dimensiones foliares fueron determinadas mediante mediciones directas realizadas en hojas completamente desarrolladas de individuos juveniles y adultos evaluados durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). Las hojas alcanzaron hasta **60 cm de longitud y 30 cm de ancho** en estados juveniles, mientras que en árboles adultos se registraron dimensiones aproximadas de **34 cm de longitud y 18 cm de ancho** (Figuras 4.6 y 4.7). Estas diferencias reflejan la variación ontogénica del área foliar y concuerdan con el desarrollo estructural de la especie.

Figura 4.6

Plántula juvenil de Juglans neotropica en etapa de vivero

Nota. Se observan hojas compuestas imparipinnadas, con foliolos opuestos de margen serrado, y el brote apical de tonalidad rojiza.

Follaje

J. neotropica presenta un follaje denso y abundante. Las hojas muestran una coloración verde oscura en el haz y verde más clara en el envés (Figura 4.7). La coloración general del follaje varía a lo largo del año y puede adquirir tonalidades verde rojizas, opacas o verde amarillentas, en función del estado fenológico y de las condiciones ambientales.

En condiciones de marcada estacionalidad, *J. neotropica* puede presentar un comportamiento parcialmente caducifolio, con pérdida temporal de parte del follaje durante determinados períodos del año (Gentry, 1996; Jørgensen & León-Yánez, 1999).

Figura 4.7

Haz y envés de hojas de Juglans neotropica

Nota. El haz presenta una tonalidad verde oscura, mientras que el envés muestra una coloración verde más clara.

Flores

La especie es monoica, con flores masculinas y femeninas separadas en el mismo individuo. Las flores masculinas se disponen en amentos colgantes, mientras que las flores femeninas se presentan solitarias o en pequeños grupos en los extremos de las ramas jóvenes.

Las flores son de color verde oscuro, las flores masculinas son estaminadas miden 30 cm de largo y las flores femeninas son pistiladas y su estigma está dividido en dos partes. Las flores masculinas y femeninas se desarrollan en diferentes ramas (Manning, 1957; Woeste & Michler, 2011).

Inflorescencias y polinización

Las inflorescencias masculinas corresponden a amentos péndulos de hasta 30 cm de longitud, con numerosas flores estaminadas (Figura 4.8). Las inflorescencias femeninas se disponen en posición terminal, alcanzan aproximadamente 4–10 cm de longitud y presentan varias flores pistiladas (Palacios, 2011; Palacios, 2016).

Figura 4.8

Inflorescencia masculina de Juglans neotropica

Las inflorescencias masculinas se desarrollan en ramas del año anterior, mientras que las femeninas emergen en brotes del año en curso. *J. neotropica* es una especie monoica y de polinización predominantemente anemófila, en la que el transporte del polen por el viento favorece la polinización cruzada. No obstante, se han registrado visitas de abejas a las inflorescencias masculinas, atraídas por la abundante producción de polen (Toro Vanegas & Roldán Rojas, 2018).

Frutos

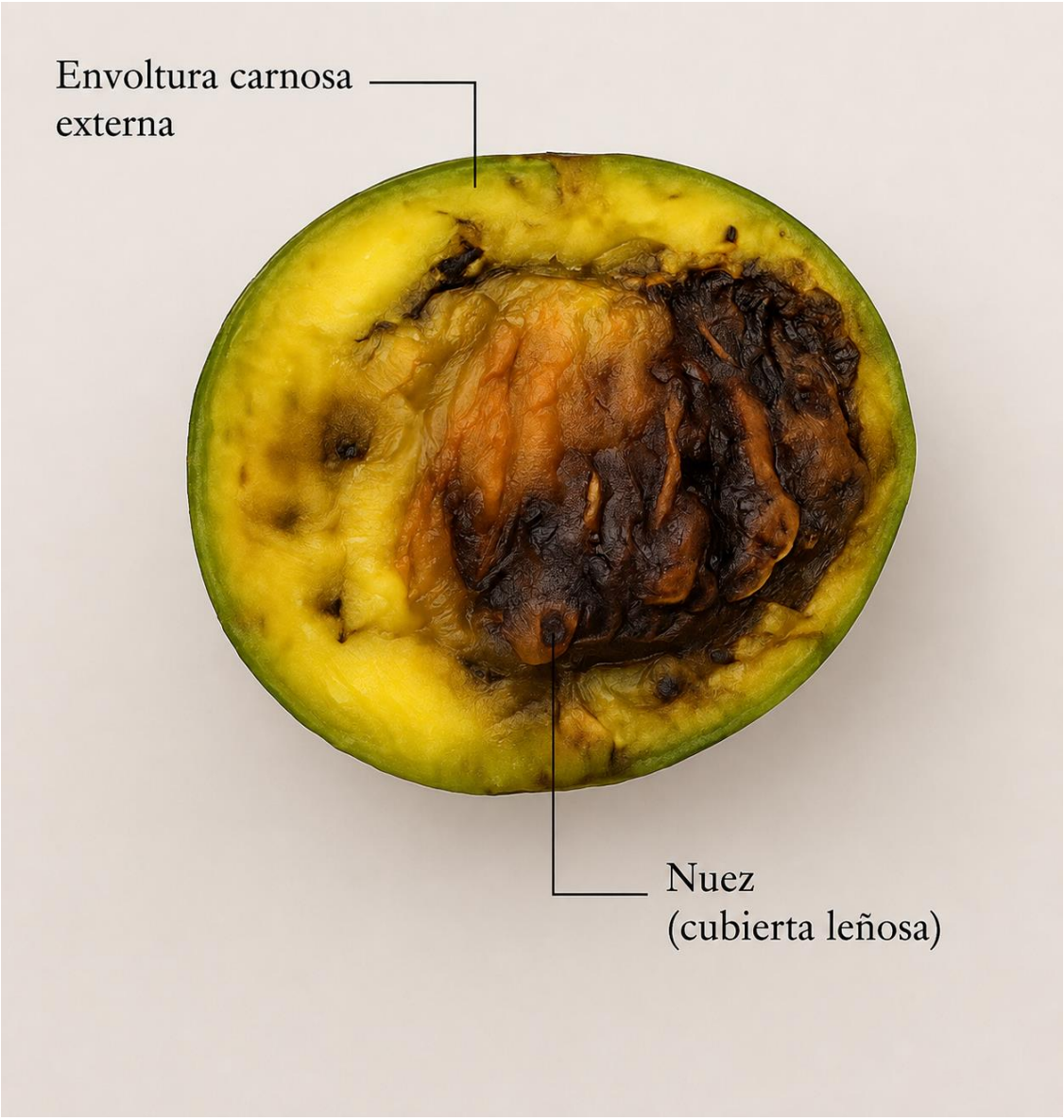
El fruto de *J. neotropica* es globoso a ovoide y presenta externamente una envoltura carnosa que rodea una nuez de consistencia leñosa. Aunque tradicionalmente ha sido descrito como una drupa o fruto drupáceo, desde el punto de vista morfológico se interpreta con mayor precisión como una nuez de apariencia drupácea, característica del género *Juglans*. La nuez es ovoide a subglobosa, con un apículo corto y una superficie provista de costillas longitudinales sinuosas (Palacios, 2011; Palacios, 2016). La disposición de las principales estructuras externas e internas del fruto se muestra en la Figura 4.9.

Observaciones del Programa *Juglans.* Las mediciones realizadas durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) evidenciaron diferencias morfométricas entre poblaciones de la especie. El diámetro promedio de la nuez fue de **3,40 cm** en individuos evaluados en Imbabura y de **3,79 cm** en la localidad de El Tundo, provincia

de Loja. Estas diferencias evidencian variación morfométrica entre los materiales evaluados en ambas localidades.

Figura 4.9

Fruto de Juglans neotropica y sus principales estructuras



Nota. El fruto presenta una envoltura carnosa externa que rodea la nuez de cubierta leñosa. Aunque tradicionalmente se ha descrito como una drupa o fruto drupáceo, su estructura se interpreta con mayor precisión como una nuez de apariencia drupácea.

Semillas

La semilla de *J. neotropica* se encuentra protegida en el interior de una nuez de cubierta dura y leñosa, cuya superficie presenta surcos y fisuras profundas características (Figura 4.10). En su interior, la semilla está constituida principalmente por un embrión con dos cotiledones grandes, lobulados y ricos en lípidos, que corresponden a la porción comestible.

Figura 4.10

Nuez de Juglans neotropica con cubierta dura y leñosa

En conjunto, las características morfológicas observadas en *J. neotropica* concuerdan en términos generales con las descripciones botánicas previamente publicadas para la especie. Las observaciones realizadas durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) permitieron complementar estas descripciones con información obtenida en poblaciones y árboles evaluados en Ecuador, particularmente sobre arquitectura arbórea, variación morfológica y desarrollo estructural. Estos aportes amplían la base científica disponible para la identificación, el manejo silvicultural y la conservación de la especie.

4.2. Filogenia, evidencia genómica y evolución de *J. neotropica*

La filogenia constituye la base para comprender las relaciones evolutivas entre los organismos mediante la integración de evidencia morfológica y molecular. En las últimas

dos décadas, el desarrollo de técnicas de secuenciación de alto rendimiento (*Next Generation Sequencing*, NGS) ha permitido reconstruir con mayor resolución la historia evolutiva de la familia Juglandaceae mediante el análisis de genomas nucleares, plastidiales y mitocondriales. Estos estudios filogenómicos han contribuido a esclarecer las relaciones entre sus principales linajes y a mejorar la estimación de los tiempos de divergencia evolutiva (Mu et al., 2020; Zhou et al., 2021).

En este contexto, *J. neotropica* representa uno de los linajes sudamericanos del género *Juglans*. La evidencia morfológica y molecular respalda su pertenencia a la sección **Rhysocaryon**, integrada por los nogales americanos, cuyas relaciones filogenéticas han sido examinadas posteriormente mediante genomas completos de cloroplasto y marcadores nucleares (Dong et al., 2017; Manos & Stone, 2001).

La presencia y diferenciación de los linajes sudamericanos de *Juglans* se produjo en un contexto de profundas transformaciones geográficas y ambientales en los Andes. Sin embargo, la evidencia disponible no permite atribuir directamente la diferenciación de *J. neotropica* a un evento específico del levantamiento andino; esta relación se aborda en este capítulo como una hipótesis biogeográfica.

4.2.1. Posición filogenética dentro de Juglandaceae

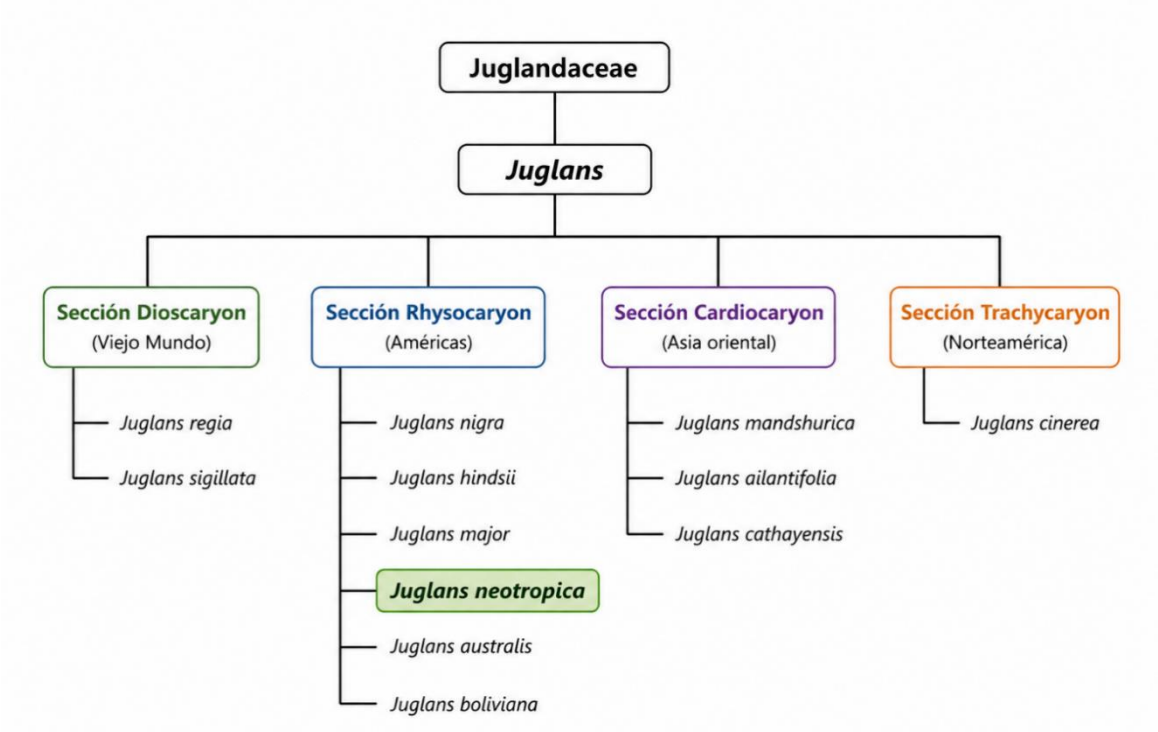
La familia **Juglandaceae** comprende aproximadamente nueve géneros y más de 60 especies vivientes, distribuidas principalmente en regiones templadas y subtropicales del hemisferio norte, con representantes que alcanzan Centro y Sudamérica. Los estudios filogenéticos y filogenómicos han confirmado la monofilia de la familia y fortalecido la delimitación de sus principales linajes evolutivos (Manos & Stone, 2001; Zhou et al., 2021).

Dentro de esta familia, el género ***Juglans*** constituye uno de los linajes mejor estudiados debido a su importancia ecológica, económica y evolutiva. Tradicionalmente se han reconocido cuatro secciones: **Dioscaryon** —también denominada *Juglans* en algunos tratamientos—, integrada por los nogales del Viejo Mundo; **Rhysocaryon**, que agrupa a los nogales americanos; **Cardiocaryon**, conformada por especies de Asia oriental; y **Trachycaryon**, representada por *Juglans cinerea*. Sin embargo, los análisis filogenómicos recientes han mostrado que la delimitación de **Trachycaryon** como sección independiente no es consistentemente respaldada por los distintos conjuntos de datos moleculares, por lo que las relaciones entre *J. cinerea* y **Cardiocaryon** continúan siendo objeto de discusión sistemática (Aradhya et al., 2007; Manos & Stone, 2001; Zhou et al., 2021).

J. neotropica pertenece a la sección **Rhysocaryon**, integrada por los nogales negros americanos. Los análisis moleculares que han incluido directamente a la especie respaldan su incorporación en este linaje y muestran su relación con el grupo de nogales tropicales americanos; dentro de Rhysocaryon, *J. neotropica* ha mostrado una afinidad particularmente cercana con otros taxones sudamericanos, como *J. australis* (Aradhya et al., 2007; Manos & Stone, 2001). Su posición filogenética dentro del género y su pertenencia a la sección **Rhysocaryon** se representan esquemáticamente en la Figura 4.11.

Figura 4.11

Posición filogenética de Juglans neotropica dentro del género Juglans



Nota. Esquema filogenético simplificado elaborado por los autores con base en evidencia morfológica, molecular y filogenómica. Se representa la ubicación de *J. neotropica* dentro de la sección *Rhysocaryon*, integrada por los nogales americanos. La clasificación y las relaciones representadas se basan principalmente en Manos y Stone (2001) y Aradhya et al. (2007), considerando la evidencia filogenómica posterior aportada por Zhou et al. (2021).

4.2.2. Evidencia filogenómica reciente

Los avances en secuenciación masiva de ADN y en análisis filogenómicos han permitido reconstruir con mayor precisión las relaciones evolutivas dentro de la familia **Juglandaceae**. A diferencia de los primeros estudios sustentados en un número limitado de marcadores moleculares, las investigaciones recientes integran información procedente de **genomas nucleares, plastomas, genomas mitocondriales y miles de marcadores SNP (*Single Nucleotide Polymorphisms*)**, proporcionando árboles filogenéticos con mayor resolución y soporte estadístico (Mu et al., 2020; Zhou et al., 2021).

Los análisis filogenómicos confirman la monofilia de la familia **Juglandaceae** y permiten resolver con mayor precisión las relaciones entre sus principales linajes. Dentro de la subfamilia **Juglandoideae**, estos estudios también han contribuido a esclarecer las relaciones evolutivas del género ***Juglans*** y de las secciones tradicionalmente reconocidas, aunque la delimitación de algunos grupos y las relaciones entre determinadas especies varían según el tipo de información genómica analizada (Mu et al., 2020; Zhou et al.,

2021). En este marco filogenético, la pertenencia de ***J. neotropica*** a la sección **Rhysocaryon**, integrada por los nogales americanos, se sustenta principalmente en estudios moleculares que incluyeron directamente a la especie (Aradhya et al., 2007; Manos & Stone, 2001).

El estudio de Zhou et al. (2021**)** constituye un aporte relevante para la comprensión evolutiva de **Juglandaceae**, al reconstruir la filogenia de la familia mediante información nuclear, plastidial y mitocondrial de 27 especies. Sus resultados estimaron el origen de la familia en aproximadamente **78,7 millones de años**, durante el Cretácico tardío, y permitieron reconstruir los principales eventos de divergencia posteriores, aportando un marco temporal para interpretar la diversificación evolutiva de sus principales linajes (Zhou et al., 2021).

Más recientemente, las revisiones sobre genómica de ***Juglans*** han integrado avances derivados de la secuenciación de genomas, transcriptómica, resecuenciación genómica, genómica comparativa y estudios de asociación del genoma completo (GWAS). Estas herramientas amplían el análisis desde las relaciones filogenéticas entre especies hacia la identificación de variación genética y genes relacionados con procesos de adaptación, resistencia a factores bióticos y abióticos y características de importancia forestal y económica (Zhao, 2024).

4.2.3. Origen y diversificación andina

La historia biogeográfica de la familia Juglandaceae y, por extensión, del género *Juglans*, se remonta al Paleógeno y está estrechamente relacionada con los cambios climáticos y geográficos globales. Modelos evolutivos e informados por el registro fósil revelan que la familia posee un origen boreotropical, caracterizado por una colonización inicial de las regiones cálidas del hemisferio norte durante el Eoceno, seguida de trayectorias evolutivas divergentes complejas (Zhang et al., 2021). La evidencia fósil y molecular sugiere que la separación temprana de los principales linajes del género ocurrió en Norteamérica, desde donde posteriormente se produjeron procesos de expansión y diferenciación geográfica. En particular, la separación entre los linajes que dieron origen a ***Rhysocaryon*** **y** ***Cardiocaryon*** se habría iniciado durante el Eoceno, seguida por la expansión de los nogales negros americanos hacia latitudes más meridionales durante el Oligoceno y el Mioceno (Aradhya et al., 2007; Zhang et al., 2021; Zhou et al., 2021).

Dentro de este contexto evolutivo, ***J. neotropica*** representa uno de los linajes sudamericanos de la sección **Rhysocaryon**, integrada por los nogales americanos. Los análisis moleculares que han incluido directamente a la especie respaldan su pertenencia a esta sección y muestran una diferenciación geográfica entre los nogales negros de Norteamérica, Centroamérica y Sudamérica. La evidencia filogenética disponible sitúa a *J. neotropica* dentro del grupo sudamericano y muestra su afinidad con otros representantes de este linaje, particularmente *J. australis* (Aradhya et al., 2007; Manos & Stone, 2001).

La historia biogeográfica propuesta para **Rhysocaryon** indica una expansión progresiva desde Norteamérica hacia regiones más meridionales del continente. La evidencia fósil señala la presencia de ***Juglans*** en Ecuador durante el Neógeno tardío, mientras que los análisis filogenéticos y biogeográficos son compatibles con una

expansión de los nogales negros hacia Sudamérica durante esta etapa de su historia evolutiva (Aradhya et al., 2007). Sin embargo, la información actualmente disponible no permite establecer con precisión cuándo se produjo la diferenciación de ***J. neotropica*** como especie ni atribuirla directamente a un evento geológico específico.

La llegada y posterior diversificación de los nogales negros en Sudamérica coincidieron con profundas transformaciones geológicas y climáticas ocurridas durante el Cenozoico, entre ellas el levantamiento progresivo de la cordillera de los Andes y la configuración de nuevos gradientes altitudinales y ambientales. Estos procesos generaron oportunidades para el aislamiento geográfico y la diferenciación ecológica de numerosos linajes vegetales. En este contexto, resulta plausible que la evolución de los nogales sudamericanos haya estado influenciada por la creciente heterogeneidad ambiental de los Andes; no obstante, esta relación debe interpretarse como una **hipótesis biogeográfica**, dado que todavía no se dispone de evidencia filogenómica específica que permita establecer una relación causal y temporal directa entre el levantamiento andino y la diferenciación de *J. neotropica*. La secuencia evolutiva y biogeográfica propuesta, desde el origen de Juglandaceae y la diversificación de *Juglans* hasta la expansión de los nogales americanos y la presencia actual de *J. neotropica* en los Andes, se sintetiza en la Figura 4.12.

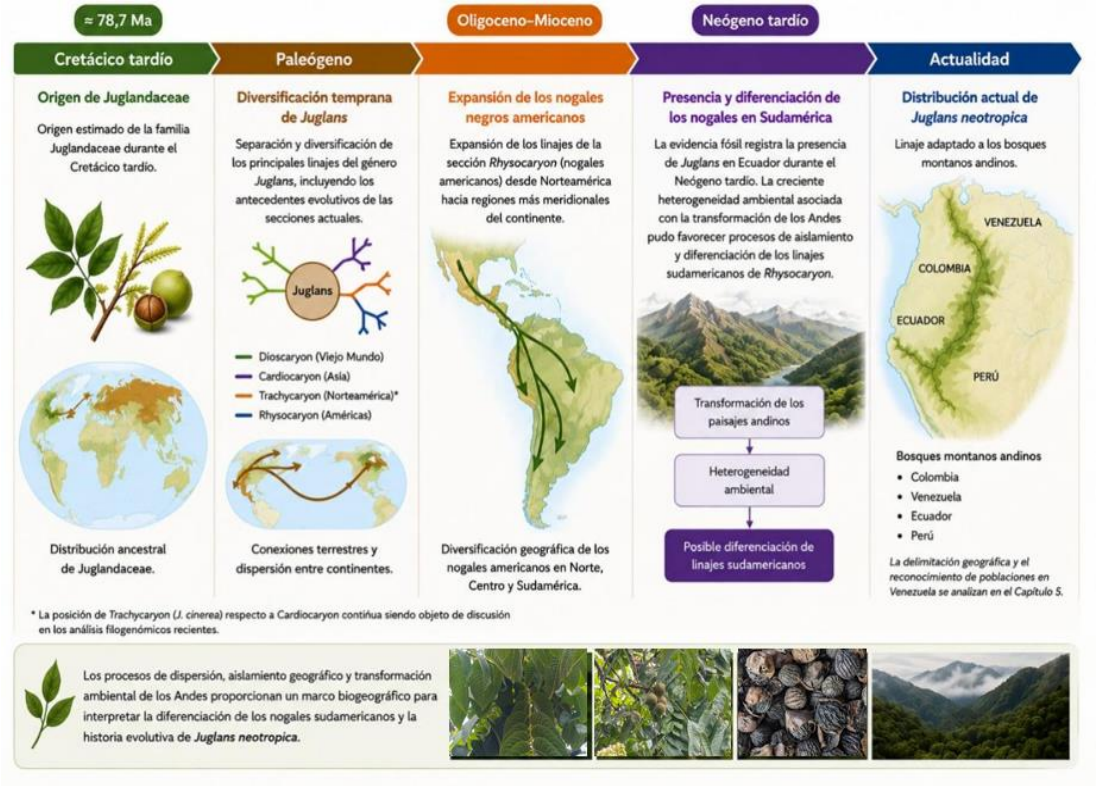
En la actualidad, *J. neotropica* se encuentra asociada principalmente con ambientes montanos tropicales del occidente de Sudamérica y se distribuye naturalmente en Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela (POWO, 2024; WFO, 2026). Esta distribución refleja su asociación con los ecosistemas andinos y constituye el resultado de una historia biogeográfica que combina dispersión continental, aislamiento geográfico y diferenciación ecológica. Fuera de su área de distribución natural, la especie también ha sido introducida con fines maderables; en Costa Rica se registra como introducida en varias regiones del país (Rojas Rodríguez & Torres Córdoba, 2008). La delimitación geográfica de la especie y el reconocimiento de determinadas poblaciones en el extremo norte de su distribución se analizan con mayor detalle en el capítulo 5.

Desde una perspectiva biogeográfica, ***J. neotropica*** constituye uno de los representantes sudamericanos de un linaje de nogales cuyo origen evolutivo antecede ampliamente a la configuración de su distribución actual. Su presencia en los Andes aporta, por tanto, evidencia de la expansión histórica de **Rhysocaryon** hacia Sudamérica y de su posterior persistencia y diferenciación en ambientes montanos tropicales (Aradhya et al., 2007).

En conjunto, la evidencia filogenética, paleobotánica y biogeográfica disponible permite interpretar a ***J. neotropica*** como parte de la diversificación sudamericana de los nogales negros americanos. Su historia evolutiva probablemente estuvo condicionada por la interacción entre dispersión, aislamiento geográfico y los cambios ambientales ocurridos durante la formación de los paisajes andinos. Sin embargo, establecer con precisión el momento de su divergencia y la influencia específica del levantamiento de los Andes requerirá estudios filogenómicos que incorporen directamente a ***J. neotropica*** y a otros representantes sudamericanos de **Rhysocaryon**.

Figura 4.12

Hipótesis de la historia evolutiva de Juglans neotropica en relación con la evolución del género Juglans



Nota. Esquema conceptual de la historia evolutiva y biogeográfica propuesta para *J. neotropica*, elaborado a partir de evidencia filogenética, filogenómica, paleobotánica y biogeográfica. La relación entre la transformación de los paisajes andinos y la diferenciación de los linajes sudamericanos se presenta como una hipótesis biogeográfica. Basado en Aradhya et al. (2007), Manos & Stone (2001), Zhao (2024) y Zhou et al. (2021).

4.2.4. Estado del conocimiento genético de *J. neotropica* en Ecuador

La diversidad genética constituye un componente esencial de la capacidad adaptativa de las especies forestales, al proporcionar la variación heredable sobre la cual pueden actuar los procesos evolutivos frente a cambios ambientales, perturbaciones y presiones selectivas. En poblaciones fragmentadas de especies forestales, la reducción del tamaño poblacional y del flujo génico puede favorecer procesos de deriva genética y aumentar el riesgo de pérdida de variabilidad genética. En *J. neotropica*, estos procesos adquieren particular relevancia debido a la fragmentación y reducción de sus poblaciones naturales en diferentes sectores de su área de distribución.

En Ecuador, uno de los primeros aportes dirigidos a la caracterización molecular de la especie fue realizado por Alberca (2014), quien evaluó la transferibilidad y utilidad

de ocho loci microsatélites o SSR (*Simple Sequence Repeats*), originalmente desarrollados para otras especies del género *Juglans*, en muestras de *J. neotropica* procedentes de subpoblaciones ubicadas en cinco provincias del país.

Los microsatélites son marcadores codominantes y altamente polimórficos que permiten identificar alelos y evaluar variación genética entre individuos y poblaciones. El estudio de Alberca (2014) comprendió la optimización de las condiciones de amplificación mediante reacción en cadena de la polimerasa (PCR), el análisis de los fragmentos mediante electroforesis capilar y la revisión de los electroferogramas obtenidos. Asimismo, se aplicaron criterios para distinguir alelos de posibles artefactos técnicos, entre ellos los patrones *stutter*, las señales *pull-up* y la adenilación incompleta.

Los resultados permitieron determinar cuáles de los loci evaluados presentaban amplificación consistente y capacidad para detectar polimorfismo en *J. neotropica*. Por tanto, uno de los principales aportes de esta investigación fue de carácter metodológico: demostró la posibilidad de transferir y utilizar en la especie marcadores microsatélites desarrollados originalmente para otros representantes del género *Juglans* y proporcionó una base técnica para posteriores estudios de diversidad y estructura genética, parentesco y flujo génico en poblaciones ecuatorianas (Alberca, 2014).

No obstante, la evaluación de un número limitado de loci y subpoblaciones representa una etapa inicial en el conocimiento de la diversidad genética molecular de *J. neotropica* en Ecuador. Para establecer con mayor precisión los niveles de diversidad alélica, heterocigosidad, diferenciación poblacional y conectividad genética, se requieren investigaciones con una cobertura geográfica más amplia y herramientas moleculares y genómicas de mayor resolución, entre ellas paneles ampliados de SSR, marcadores SNP, genotipado por secuenciación y resecuenciación genómica.

La generación de esta información permitiría identificar poblaciones genéticamente diferenciadas, evaluar la conectividad entre ellas y establecer criterios para la selección de fuentes de germoplasma destinadas a conservación, restauración, producción forestal y mejoramiento genético. Asimismo, proporcionaría una base científica para orientar la recolección de material reproductivo a partir de un número y una distribución adecuados de árboles semilleros, con el propósito de conservar una representación amplia de la diversidad genética en futuras plantaciones y programas de restauración.

De manera complementaria a los estudios moleculares, el mejoramiento genético de *J. neotropica* en Ecuador ha comenzado a abordarse mediante la evaluación de progenies en ensayos de campo. Ramos-Veintimilla et al. (2024a) evaluaron familias obtenidas mediante polinización abierta a partir de árboles madre seleccionados en la provincia de Tungurahua y establecidas en un ensayo genético en Tunshi, Chimborazo. Aunque los análisis estadísticos convencionales no detectaron diferencias significativas entre las familias para las variables dasométricas evaluadas, los análisis multivariados permitieron diferenciar grupos de individuos con comportamiento superior, intermedio y de vigilancia. Entre los materiales que presentaron individuos sobresalientes se identificaron las familias J18, J13, J20, TOAFP1, J22, J37, J9 y J14, consideradas de interés para posteriores etapas de selección y mejoramiento genético de la especie.

Estos resultados amplían el conocimiento genético de la especie al incorporar la evaluación fenotípica de progenies bajo condiciones de campo. Sin embargo, debido a que las familias evaluadas proceden de semillas de polinización abierta y el estudio se sustentó en variables fenotípicas y dasométricas, sus diferencias no deben interpretarse como una estimación directa de la diversidad genética molecular. La integración futura de ensayos de progenies con marcadores moleculares y herramientas genómicas permitiría determinar con mayor precisión la contribución genética y ambiental a la variación observada y fortalecer los procesos de selección de material para conservación, restauración y producción forestal. El ensayo fue establecido con progenies de árboles madre seleccionados, bajo un diseño de bloques incompletos aleatorizados, lo que constituye una base experimental para continuar los procesos de evaluación y selección.

En conjunto, los estudios de Alberca (2014) y Ramos-Veintimilla et al. (2024a) representan dos aproximaciones complementarias al conocimiento genético de *J. neotropica* en Ecuador: la primera aporta una base metodológica para su caracterización molecular mediante marcadores microsatélites, mientras que la segunda incorpora la evaluación de progenies y la identificación de individuos fenotípicamente sobresalientes en condiciones de campo. No obstante, el conocimiento disponible continúa siendo insuficiente para caracterizar integralmente la diversidad y estructura genética de las poblaciones ecuatorianas y establecer la base genética de la variación fenotípica observada. Este vacío constituye una línea prioritaria de investigación para sustentar estrategias de conservación *in situ* y *ex situ*, restauración, manejo de germoplasma y mejoramiento genético de la especie.

Los aspectos relacionados con la calidad genética de las semillas y la descripción detallada de los ensayos y plantaciones vinculados con el mejoramiento genético de *J. neotropica* se desarrollan en los capítulos 7 y 9, respectivamente.

4.2.5. Implicaciones evolutivas y conservación genética de *J. neotropica*

La información filogenética y genética disponible permite reconocer a ***J. neotropica*** como un linaje diferenciado dentro del género ***Juglans*** y como uno de los representantes sudamericanos de la sección **Rhysocaryon**. Su historia biogeográfica, vinculada con la expansión de los nogales negros americanos hacia Sudamérica y su posterior diferenciación en ambientes andinos, le confiere particular interés desde la perspectiva de la conservación de la diversidad filogenética. En este sentido, la pérdida de sus poblaciones naturales implicaría no solo una reducción de la abundancia de la especie, sino también la pérdida de diversidad genética y de una fracción de la historia evolutiva representada por este linaje (Aradhya et al., 2007; Faith, 1992; Manos & Stone, 2001).

Desde una perspectiva de conservación, la evidencia disponible resalta la importancia de preservar no solo las poblaciones remanentes, sino también la diversidad genética contenida en ellas. La fragmentación y reducción de las poblaciones puede modificar el flujo génico, disminuir el tamaño efectivo poblacional y favorecer procesos de deriva genética, con posibles consecuencias sobre su capacidad adaptativa frente a cambios ambientales futuros. En este contexto, la conservación ***in situ*** de poblaciones naturales debería complementarse con estrategias ***ex situ*** que incluyan bancos de

germoplasma, colecciones vivas y programas de propagación orientados a mantener una representación adecuada de la diversidad genética de la especie.

Por otra parte, la pertenencia de ***J. neotropica*** a **Rhysocaryon** y sus relaciones evolutivas con otros nogales americanos proporcionan un marco de referencia para investigaciones comparativas sobre filogenia, evolución y adaptación. Los estudios moleculares que han incluido directamente a la especie muestran su integración en el linaje de los nogales negros americanos y su relación con otros representantes sudamericanos de la sección (Aradhya et al., 2007). Asimismo, los avances recientes en genómica de ***Juglans*** ofrecen herramientas para orientar futuras investigaciones sobre diversidad genética, adaptación y selección de material reproductivo, con aplicaciones potenciales en conservación, restauración y mejoramiento genético (Zhou et al., 2021; Zhao, 2024).

Finalmente, el conocimiento sobre la diversidad y estructura genética de ***J. neotropica*** en Ecuador continúa siendo limitado. Los antecedentes disponibles constituyen una base inicial, pero se requieren estudios con mayor cobertura geográfica y herramientas genómicas de alta resolución para comprender los patrones de diversidad, conectividad, diferenciación poblacional y posible adaptación local. Esta información será fundamental para identificar poblaciones prioritarias para la conservación, orientar la selección y manejo de fuentes de germoplasma, fortalecer los programas de restauración forestal y contribuir al mantenimiento del potencial evolutivo de la especie frente al cambio climático y la transformación de los paisajes andinos (Alberca, 2014).

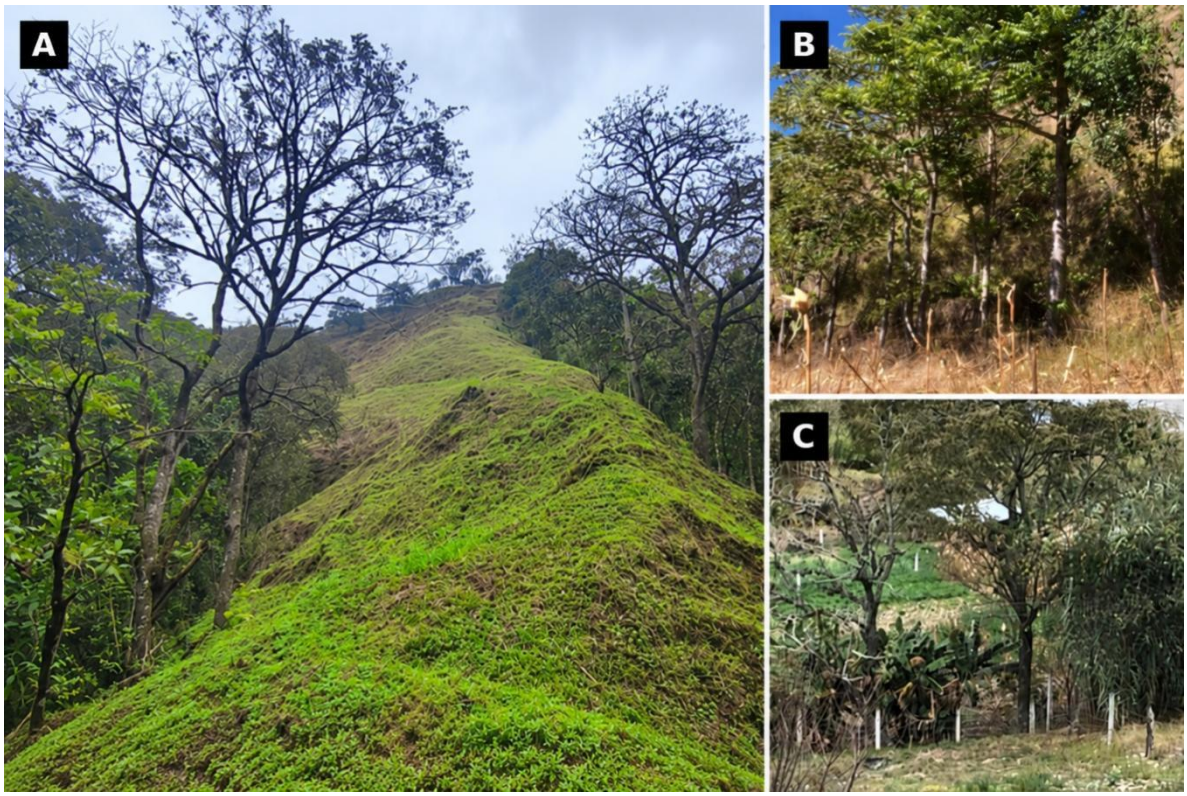
CAPÍTULO 5

Distribución geográfica y ecología de *Juglans neotropica* frente al cambio climático

Capítulo

5

Distribución geográfica y ecología de *Juglans neotropica* frente al cambio climático



A) Paisaje con presencia de *J. neotropica* en el cerro Zañe, Loja. **B)** Árbol de *J. neotropica* en un predio cultivado con maíz en Las Palmas, Bolívar. **C)** Árbol de *J. neotropica* integrado en un paisaje agropecuario de Biblián, Cañar, Ecuador. Fotografía A: Augusto Pinzón; fotografías B y C: Mario Añazco.

La distribución geográfica y la ecología de *Juglans neotropica* constituyen el fundamento para comprender los factores ambientales que condicionan su presencia y persistencia en los paisajes andinos del Ecuador. La distribución de la especie responde a la interacción entre la altitud, el clima, los suelos y los ecosistemas donde se desarrolla, configurando un nicho ecológico cuya caracterización resulta esencial para orientar la conservación, el manejo forestal, la restauración ecológica y el establecimiento de nuevas plantaciones con base en criterios ecológicos y biogeográficos.

La información presentada en este capítulo integra registros bibliográficos, inventarios forestales y una base de datos con más de 100 registros georreferenciados de presencia de *J. neotropica*, generada principalmente mediante estudios y recorridos de campo desarrollados en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). Esta información permitió documentar la presencia de la especie en 14 provincias del Ecuador y proporciona la base para examinar su distribución geográfica y sus relaciones con la altitud, el clima, los suelos y los ecosistemas.

A partir de esta información se caracteriza el nicho ecológico de la especie, se examinan los principales factores ambientales asociados con su distribución y se analiza su vulnerabilidad potencial frente a escenarios de cambio climático. Este enfoque integrador proporciona criterios técnicos para la conservación *in situ*, la restauración de paisajes forestales, la planificación de nuevas plantaciones y el manejo sostenible de *J. neotropica*.

5.1. Distribución geográfica de *J. neotropica* en Ecuador

J. neotropica presenta una distribución discontinua en la región andina del Ecuador, donde se encuentra en bosques montanos, remanentes forestales, sistemas agroforestales, árboles aislados y plantaciones establecidas con fines de conservación, restauración, producción e investigación. Su presencia actual refleja tanto la distribución histórica de los bosques andinos como los procesos de transformación y fragmentación del paisaje.

La documentación de la distribución de la especie a escala nacional integró información procedente de la literatura científica, la Evaluación Nacional Forestal del Ecuador, inventarios forestales provinciales, informantes clave y registros obtenidos directamente en campo. Un antecedente fundamental fue la Evaluación Nacional Forestal del Ecuador (2010–2013), desarrollada por el Ministerio del Ambiente del Ecuador con el apoyo técnico de la FAO. Mediante una red sistemática de parcelas establecidas en los principales ecosistemas forestales del país, este inventario forestal multipropósito registró la presencia de *J. neotropica* y la incorporó en la Lista de especies de árboles registrados en el Inventario Nacional Forestal (Anexo 4). Este constituye el primer inventario forestal de cobertura nacional que documentó sistemáticamente la presencia de la especie mediante una metodología estandarizada de muestreo (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2014a).

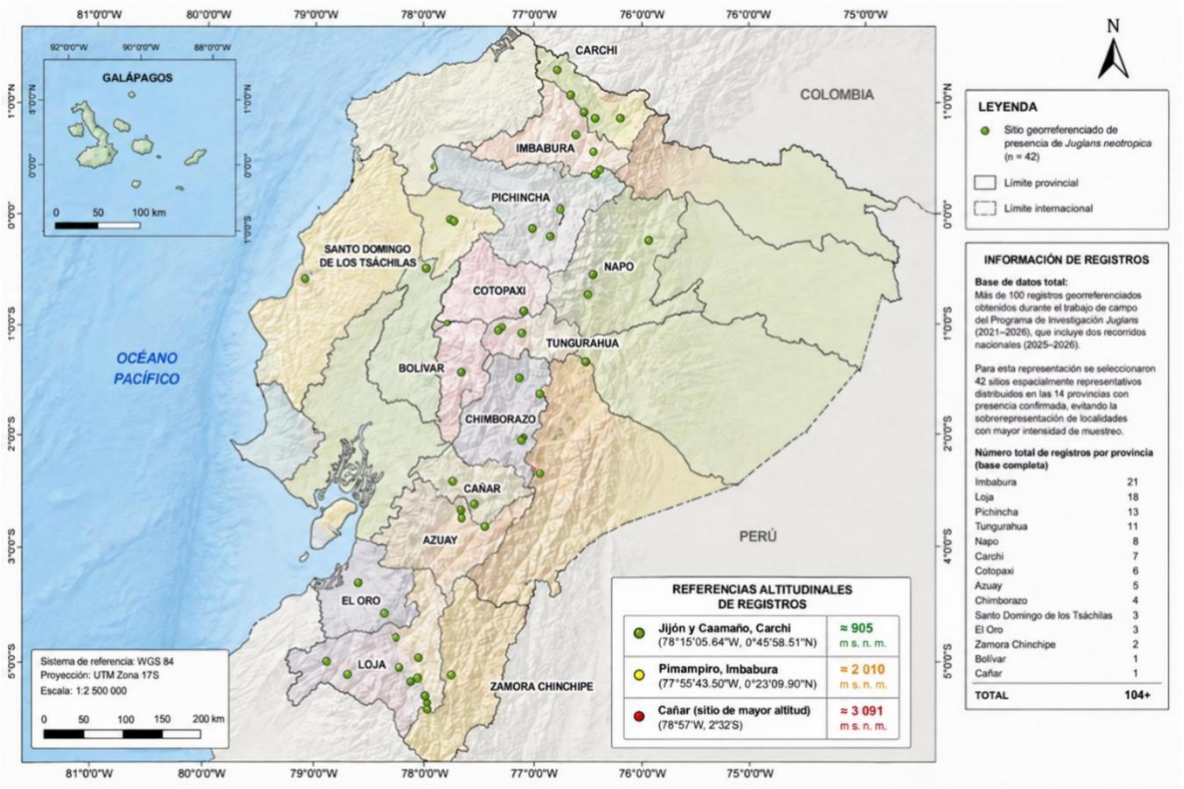
La información disponible fue ampliada mediante los estudios de campo del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). Debido a que la intensidad de muestreo no fue homogénea entre provincias y localidades, para la representación cartográfica y los análisis espaciales se seleccionaron 42 sitios de la base nacional de más de 100

registros georreferenciados. La selección procuró representar las 14 provincias con presencia confirmada, conservar la amplitud geográfica y altitudinal observada y reducir la redundancia derivada de registros espacialmente próximos. De esta manera, se evitó que las localidades con mayor esfuerzo de muestreo adquirieran un peso desproporcionado en la interpretación de la distribución nacional. Los registros de campo fueron georreferenciados y sistematizados mediante la plataforma KoboToolbox.

Los sitios seleccionados permitieron representar la distribución geográfica documentada de *J. neotropica* en Ecuador y constituyen la referencia espacial para los análisis de los gradientes ambientales asociados con su presencia que se desarrollan en los apartados siguientes (Figura 5.1).

Figura 5.1

Distribución geográfica documentada de Juglans neotropica en Ecuador



Nota. El mapa representa sitios georreferenciados seleccionados de la base nacional de registros de *J. neotropica* y su distribución en las 14 provincias con presencia documentada. Los registros proceden principalmente del trabajo de campo desarrollado en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), complementado con fuentes bibliográficas e inventarios forestales. Límites provinciales: Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2022), *Marco Geoestadístico Nacional 2022*. Sistema de referencia geográfica**:** WGS 84.

Distribución por provincias

Los registros georreferenciados obtenidos durante el estudio confirman la presencia de *J. neotropica* en las regiones Sierra, Amazonía y, de manera puntual, en las

estribaciones occidentales vinculadas con la región Costa. La distribución documentada se extiende principalmente a lo largo del corredor interandino y de las vertientes internas y externas de la cordillera, desde Carchi, en el norte, hasta Loja y Zamora Chinchipe, en el sur. Este patrón evidencia una distribución predominantemente andina, aunque con extensiones hacia zonas de transición ecológica en las vertientes occidental y oriental.

La especie fue registrada en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, Bolívar, Cañar, Azuay, Loja, Zamora Chinchipe, Napo, El Oro y Santo Domingo de los Tsáchilas. La representación cartográfica incluye sitios seleccionados en cada una de estas provincias y evita interpretar la cantidad de registros por provincia como una medida directa de abundancia o frecuencia de la especie.

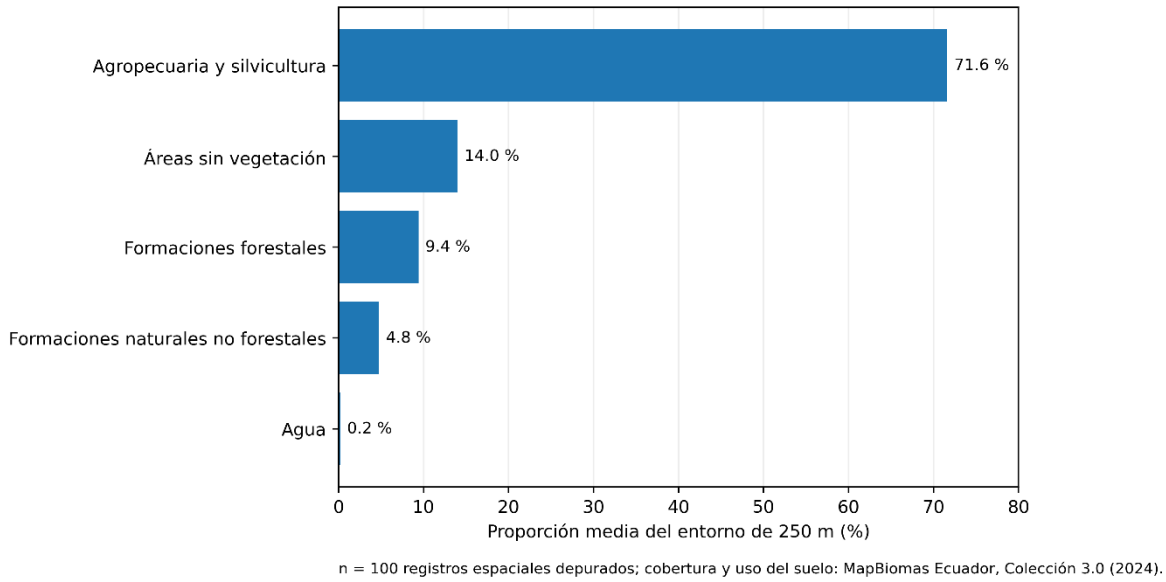
La distribución de *J. neotropica* presenta diferencias regionales. En la provincia de Loja predominan las poblaciones naturales asociadas a relictos de bosques andinos, mientras que en Napo son frecuentes los procesos de regeneración natural. En la mayor parte de las restantes provincias, la especie se encuentra formando parte de sistemas agroforestales, como árboles dispersos y en remanentes boscosos. Asimismo, se ha registrado su presencia en el arbolado urbano de varias ciudades andinas, entre ellas Ibarra, Quito, Riobamba, Cuenca y Loja, así como en huertos urbanos y otros espacios verdes asociados a viviendas. Por otra parte, Imbabura y Chimborazo concentran las principales plantaciones establecidas con fines de mejoramiento genético y conservación *ex situ*, constituyendo actualmente sitios relevantes para la investigación experimental de la especie en Ecuador.

Este patrón de distribución evidencia que, además de persistir en poblaciones naturales fragmentadas, *J. neotropica* mantiene actualmente una importante presencia en paisajes intervenidos mediante sistemas agroforestales, plantaciones y programas de restauración. La coexistencia de poblaciones naturales, regeneración espontánea e individuos establecidos mediante diferentes modalidades de manejo amplía las posibilidades para la conservación y el manejo sostenible de la especie tanto dentro como fuera de los remanentes de bosque andino.

Con el propósito de complementar la distribución geográfica documentada con una caracterización del paisaje asociado a los registros de la especie, se analizó la cobertura y el uso del suelo mediante MapBiomas Ecuador, Colección 3.0, utilizando la cobertura correspondiente a 2024 (Holguín et al., 2025). El análisis consideró 100 registros georreferenciados depurados de *J. neotropica* y la composición de la cobertura en un radio de 250 m alrededor de cada punto. En promedio, el 71,6 % del entorno correspondió a coberturas agropecuarias y silvícolas, mientras que las áreas sin vegetación representaron el 14,0 %, las formaciones forestales el 9,4 %, las formaciones naturales no forestales el 4,8 % y los cuerpos de agua el 0,2 % (Figura 5.2). A escala puntual, 79 de los 100 registros (79,0 %) coincidieron con píxeles clasificados como mosaico de agricultura y/o pastos, mientras que seis registros (6,0 %) correspondieron a bosque. Estos resultados confirman que, en la base analizada, la presencia documentada de *J. neotropica* se encuentra predominantemente asociada con paisajes transformados y matrices productivas, en concordancia con las observaciones de campo de la especie en linderos, plantaciones lineales, árboles dispersos y aislados, sistemas agrosilvícolas y silvopastoriles, además de ambientes urbanos y remanentes con cobertura forestal.

Figura 5.2

Contexto de cobertura y uso del suelo alrededor de los registros georreferenciados de Juglans neotropica en Ecuador



Nota. Los valores representan la proporción media de los grandes grupos de cobertura y uso del suelo en un radio de 250 m alrededor de 100 registros espaciales depurados de *J. neotropica*. La cobertura corresponde al año 2024 de MapBiomas Ecuador, Colección 3.0 (Holguín et al., 2025). La clasificación se basa en imágenes Landsat con resolución espacial de 30 m; por tanto, los resultados caracterizan el contexto paisajístico de los registros y no necesariamente la cobertura específica ocupada por cada árbol.

5.2. Nicho ecológico

El nicho ecológico de *J. neotropica* está determinado por la interacción de factores climáticos, topográficos y edáficos que condicionan su establecimiento, crecimiento y regeneración. Entre las variables ambientales relevantes para caracterizar su distribución se encuentran la altitud, la temperatura y la precipitación, cuyos gradientes se relacionan con cambios en la disponibilidad de agua y energía y con las condiciones ambientales bajo las cuales la especie puede desarrollarse. El análisis conjunto de estas variables permite aproximarse a la amplitud ambiental asociada con la presencia de *J. neotropica* en Ecuador y proporciona una base para interpretar su respuesta frente a la heterogeneidad de los paisajes andinos y a escenarios de cambio climático.

5.2.1. Gradiente altitudinal

La distribución altitudinal de *J. neotropica* en Ecuador muestra una marcada asociación con los ambientes montanos de la cordillera de los Andes, aunque los registros georreferenciados evidencian una amplitud considerable. Entre los sitios con información altitudinal verificada, los registros representados en el mapa se extienden desde **905 m s. n. m. en Jijón y Caamaño, provincia Carchi, hasta 3 091 m s. n. m. en Cañar**, lo que representa un gradiente cercano a 2 186 m. Como referencia intermedia,

Pimampiro, en la provincia de Imbabura, registra **2 010 m s. n. m.** Estos valores evidencian que la presencia documentada de la especie comprende condiciones altitudinales contrastantes, desde sectores de menor elevación en las estribaciones andinas hasta ambientes montanos situados por encima de los 3 000 m s. n. m.

Variación espacial del gradiente altitudinal

La distribución de los registros muestra que *J. neotropica* no ocupa una franja altitudinal uniforme a lo largo del país. Su presencia comprende valles interandinos, laderas internas y estribaciones occidentales y orientales de la cordillera, configurando un gradiente asociado con la elevada heterogeneidad topográfica y ambiental de los Andes ecuatorianos. Los registros de menor altitud amplían la presencia documentada de la especie hacia sectores bajos de las estribaciones, mientras que aquellos situados por encima de los 3 000 m s. n. m. muestran su ocurrencia en ambientes montanos altos.

Esta amplitud altitudinal debe interpretarse considerando que los registros proceden de localidades con diferente intensidad de muestreo y representan diversos contextos ecológicos y de manejo. Por ello, la distribución de los puntos no constituye una medida directa de abundancia o preferencia ambiental, ni permite establecer por sí sola un intervalo altitudinal óptimo para la especie.

Este gradiente observado en el territorio ecuatoriano redefine los límites ecológicos reportados en la literatura global. Referencias internacionales consolidadas, como el compendio forestal de CABI (2019), sitúan el rango altitudinal teórico para *J. neotropica* entre los 800 y los 3 000 m s. n. m. No obstante, los datos empíricos de este estudio demuestran un desplazamiento hacia pisos ecológicos más elevados en el contexto local; mientras que el límite inferior real no desciende de los 900 m s. n. m. (fijado en Jijón y Caamaño a 905 m s. n. m.), el límite superior rompe la barrera teórica de la especie al registrar poblaciones estables por encima de la cota máxima referencial, alcanzando los 3 091 m s. n. m. en la provincia de Cañar.

Interpretación ecológica y biogeográfica

El gradiente altitudinal documentado evidencia que *J. neotropica* puede estar presente bajo condiciones ambientales contrastantes a lo largo de los Andes ecuatorianos. Esta amplitud adquiere particular relevancia desde una perspectiva ecológica y biogeográfica, debido a que las variaciones de altitud están asociadas con cambios en temperatura, precipitación, humedad, características edáficas y otros factores que pueden influir en el establecimiento, crecimiento y regeneración de la especie.

A esta heterogeneidad ambiental se suma la diversidad de contextos en los que actualmente persiste *J. neotropica*, incluidos poblaciones y remanentes de bosque natural, regeneración natural, sistemas agroforestales, árboles dispersos, plantaciones, huertos y arbolado urbano. En consecuencia, su distribución actual refleja la interacción entre procesos ecológicos y biogeográficos y la influencia histórica y contemporánea del manejo humano.

Los registros situados en los extremos del gradiente altitudinal adquieren especial interés para la investigación y conservación, pues permiten identificar localidades donde

podrían evaluarse diferencias en crecimiento, fenología, regeneración y respuesta a factores climáticos. No obstante, la presencia de la especie bajo condiciones altitudinales contrastantes no demuestra por sí misma adaptación local; esta hipótesis requiere estudios específicos de procedencias, genética y respuesta ecofisiológica.

En términos aplicados, la altitud constituye una referencia importante para orientar la conservación, restauración y establecimiento de *J. neotropica*, pero no debe emplearse de manera aislada ni como criterio excluyente. La selección de sitios requiere integrar temperatura, precipitación, disponibilidad hídrica, características del suelo, ecosistema, procedencia del material vegetal y condiciones microambientales. Por tanto, el gradiente altitudinal documentado debe entenderse como una expresión de la **distribución observada de la especie en Ecuador**, y no como una delimitación definitiva de su nicho ecológico o de su rango fisiológico potencial.

5.2.2. Gradiente térmico

La temperatura media anual asociada con los registros georreferenciados de *J. neotropica* evidencia una amplitud térmica considerable dentro de los Andes ecuatorianos. En la base de datos climática disponible, los valores extremos se sitúan entre **10,96 °C**, registrados en El Ángel, provincia de Carchi, a una altitud cercana a 3 035 m s. n. m., y **21,89 °C** en Piñas, provincia de El Oro, en registros localizados alrededor de 1 130–1 140 m s. n. m. Este intervalo, cercano a 11 °C, muestra que la presencia documentada de la especie comprende desde ambientes fríos de los pisos montanos altos hasta condiciones relativamente cálidas en sectores de menor elevación de las estribaciones andinas.

El gradiente térmico presenta una relación general con el gradiente altitudinal descrito en el apartado anterior. Los registros situados a mayor elevación tienden a estar asociados con temperaturas medias anuales menores, mientras que aquellos localizados en cotas inferiores presentan condiciones térmicas más elevadas. Esta correspondencia es particularmente evidente al comparar localidades situadas en los extremos del gradiente. No obstante, la relación entre altitud y temperatura no es uniforme a escala nacional, debido a la influencia adicional de la latitud, exposición de las vertientes, topografía y circulación atmosférica regional.

Variación espacial del gradiente térmico

La distribución espacial de los registros muestra que *J. neotropica* está presente bajo condiciones térmicas contrastantes. En el norte de los Andes ecuatorianos se registran localidades de elevada altitud y temperaturas medias anuales próximas a 11 °C, junto con numerosos sitios montanos bajo condiciones térmicas intermedias. Hacia sectores de menor elevación, particularmente en las estribaciones occidentales, la temperatura aumenta y alcanza valores superiores a 20 °C, como ocurre en Piñas, El Oro.

Esta amplitud no debe interpretarse como evidencia de que la temperatura actúa de manera independiente sobre la distribución de la especie. Su efecto se encuentra estrechamente relacionado con la precipitación, disponibilidad hídrica, humedad atmosférica, características del suelo y condiciones topográficas y microambientales. Por

ello, localidades con altitudes semejantes pueden presentar condiciones térmicas diferentes dependiendo de su posición geográfica y configuración ambiental.

Interpretación ecológica

La presencia documentada de *J. neotropica* en un gradiente térmico que comprende aproximadamente desde **11 hasta 22 °C de temperatura media anual** evidencia una amplitud climática relevante para la especie dentro del contexto andino. Sin embargo, estos valores corresponden a las condiciones climáticas asociadas con los sitios actualmente documentados y no deben interpretarse como límites fisiológicos de tolerancia ni como un intervalo térmico óptimo.

Los registros situados en los extremos del gradiente adquieren especial interés ecológico. Las poblaciones presentes bajo condiciones térmicas contrastantes constituyen referencias para investigar posibles diferencias en fenología, crecimiento, regeneración y respuesta fisiológica. Asimismo, ofrecen oportunidades para evaluar si la amplitud ambiental observada está asociada con variación genética o adaptación local, hipótesis que requieren estudios específicos y no pueden inferirse únicamente a partir de los registros de presencia.

Desde una perspectiva aplicada, la temperatura constituye una variable relevante para orientar la conservación, restauración ecológica y establecimiento de plantaciones de *J. neotropica*, pero debe analizarse conjuntamente con la precipitación, disponibilidad hídrica, suelo, procedencia del material vegetal y condiciones microambientales. La amplitud térmica documentada adquiere además especial importancia frente al cambio climático, pues proporciona una referencia para evaluar cambios futuros en la exposición climática de las poblaciones y en la disponibilidad de ambientes adecuados para la especie.

5.2.3. Régimen de precipitación

La precipitación asociada con los sitios de presencia de *J. neotropica* evidencia una amplia variabilidad hídrica dentro de su distribución documentada en Ecuador. Los registros comprenden desde localidades relativamente secas de los valles interandinos hasta ambientes muy húmedos de las estribaciones occidentales de los Andes. En Salcedo, provincia de Cotopaxi, donde se encuentra documentada la presencia de la especie, las condiciones climáticas del territorio comprenden precipitaciones anuales de aproximadamente **500 a 1 250 mm**, mientras que en la Estación Experimental La Favorita, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, se reportan precipitaciones del orden de **2 500 a 3 000 mm/año**. Estos valores evidencian la presencia de *J. neotropica* bajo regímenes pluviométricos marcadamente contrastantes.

La base climática georreferenciada complementa este patrón y muestra numerosos registros asociados con condiciones intermedias de precipitación. En conjunto, la información disponible indica que la presencia documentada de *J. neotropica* no se restringe a un intervalo pluviométrico estrecho. Sin embargo, los valores observados corresponden a condiciones climáticas de localidades con presencia de la especie y no deben interpretarse como límites fisiológicos de tolerancia ni como un rango óptimo de precipitación.

Variación espacial del régimen de precipitación

La amplitud pluviométrica observada refleja la elevada heterogeneidad climática de los Andes ecuatorianos. En los valles interandinos y sectores sometidos a condiciones relativamente secas se presentan precipitaciones considerablemente menores que en las vertientes externas de la cordillera Occidental. El contraste entre Salcedo y La Favorita ilustra esta variación: mientras el primero se encuentra en un contexto interandino con regímenes de precipitación relativamente bajos a moderados, La Favorita se localiza en una zona de transición hacia las estribaciones occidentales húmedas, donde la precipitación anual puede alcanzar aproximadamente 3 000 mm.

Estas diferencias responden a la interacción entre altitud, relieve, orientación de las vertientes y circulación de masas de aire provenientes del Pacífico y de la cuenca amazónica. En consecuencia, localidades con presencia de *J. neotropica* pueden presentar regímenes pluviométricos muy diferentes dependiendo de su posición dentro del sistema orográfico andino.

Interpretación ecológica

La presencia documentada de *J. neotropica* tanto en ambientes interandinos relativamente secos como en sectores con precipitaciones cercanas a **3 000 mm/año** evidencia una considerable amplitud pluviométrica dentro de su distribución conocida en Ecuador. Esta amplitud sugiere que la precipitación anual, considerada aisladamente, no explica la presencia de la especie y que su respuesta depende de la interacción con otros componentes del ambiente.

La precipitación anual tampoco equivale necesariamente a la disponibilidad efectiva de agua para las plantas. Su influencia depende de la distribución estacional de las lluvias, la temperatura y la evapotranspiración, así como de las características físicas del suelo, la topografía, la cobertura vegetal y las condiciones microambientales. A ello se suma que algunos individuos y plantaciones de *J. neotropica* se desarrollan en sistemas productivos, agroforestales o urbanos donde la disponibilidad hídrica puede complementarse mediante riego. Por esta razón, la presencia de la especie en localidades relativamente secas no demuestra por sí sola una tolerancia equivalente al déficit hídrico bajo condiciones estrictamente naturales.

Desde una perspectiva aplicada, el régimen de precipitación constituye un criterio relevante para orientar la conservación, restauración ecológica y establecimiento de plantaciones de *J. neotropica*, pero debe evaluarse conjuntamente con la disponibilidad hídrica efectiva, temperatura, características del suelo, procedencia del material vegetal y condiciones locales del sitio. Los registros presentes bajo condiciones pluviométricas contrastantes adquieren particular interés para futuras investigaciones sobre crecimiento, regeneración, respuesta al déficit o exceso de humedad y posible variación adaptativa de la especie.

5.2.4. Interacción entre variables bioclimáticas

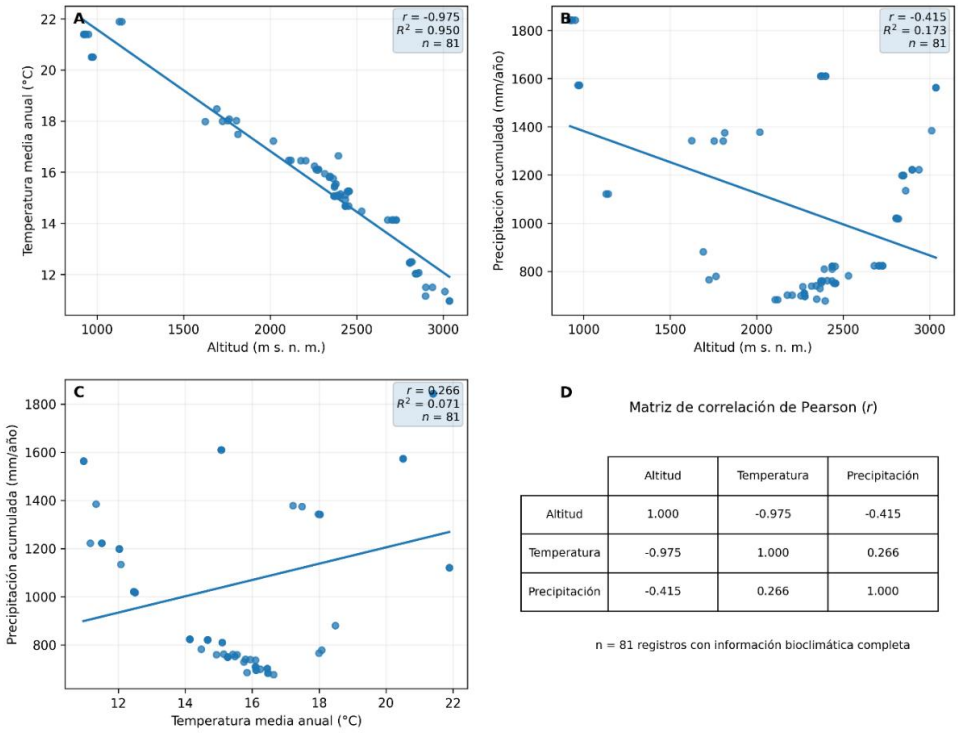
La distribución de *J. neotropica* en Ecuador está asociada con la interacción entre diferentes componentes del ambiente, entre ellos la altitud, la temperatura y la

precipitación. Con el propósito de examinar las relaciones entre estas variables, se analizaron los 81 registros de la base climática disponible que cuentan simultáneamente con información de altitud, temperatura media anual y precipitación acumulada. El análisis mediante el coeficiente de correlación de Pearson permitió identificar diferencias importantes en la intensidad y dirección de las relaciones entre estos gradientes ambientales (Figura 5.3). Este subconjunto analítico es distinto de los 42 sitios seleccionados para la representación cartográfica: los 42 sitios reducen la redundancia espacial del mapa, mientras que los 81 registros corresponden a observaciones con información bioclimática completa utilizadas para el análisis estadístico.

La relación más fuerte se observó entre la altitud y la temperatura media anual, con una correlación negativa muy alta ($r = -0{,}975$; $R^2 = 0{,}950$). Este resultado indica que, dentro de los registros analizados, el incremento de la altitud está estrechamente asociado con la disminución de la temperatura media anual. La altitud explica aproximadamente el 95 % de la variación lineal observada en la temperatura de esta base, lo que refleja el marcado gradiente térmico característico de los sistemas montañosos andinos.

Figura 5.3

Relaciones entre altitud, temperatura media anual y precipitación en registros georreferenciados de Juglans neotropica en Ecuador



Nota. Los gráficos de dispersión representan las relaciones entre altitud, temperatura media anual y precipitación acumulada para los 81 registros con información bioclimática completa. Las líneas corresponden a ajustes de regresión lineal y se presentan sus respectivos coeficientes de determinación (R^2). La matriz resume los coeficientes de correlación de Pearson (r) entre las variables analizadas. Elaborado por los autores a partir de la base climática asociada con los registros georreferenciados de *J. neotropica*.

La relación entre altitud y precipitación fue negativa y de magnitud moderada ($r = -0{,}415$; $R^2 = 0{,}173$), considerablemente más débil que la observada entre altitud y temperatura. Este resultado evidencia que la precipitación presenta una mayor variabilidad espacial y que su comportamiento no está determinado principalmente por la elevación. Factores como la orientación de las vertientes, el relieve, la circulación atmosférica regional y la influencia de masas de aire húmedo provenientes del Pacífico y de la cuenca amazónica contribuyen a generar patrones pluviométricos contrastantes a lo largo de los Andes ecuatorianos.

Por su parte, la relación entre temperatura media anual y precipitación fue positiva, pero débil ($r = 0{,}266$; $R^2 = 0{,}071$). En consecuencia, las diferencias térmicas explican una proporción reducida de la variación observada en la precipitación de los registros analizados. Este comportamiento refuerza la importancia de considerar la precipitación como una variable espacialmente compleja, condicionada por múltiples factores geográficos y atmosféricos además de la temperatura.

Interpretación ecológica e implicaciones para la conservación

El análisis conjunto evidencia dos comportamientos diferenciados. Por una parte, la altitud y la temperatura presentan una relación estrecha y predecible; por otra, la precipitación muestra relaciones considerablemente más débiles tanto con la altitud como con la temperatura. En consecuencia, la altitud funciona como un buen descriptor del gradiente térmico asociado con los registros analizados, pero no permite inferir con la misma precisión las condiciones de precipitación de una localidad.

Desde una perspectiva ecológica, estos resultados muestran la necesidad de interpretar conjuntamente las variables ambientales asociadas con la presencia de *J. neotropica*. La altitud constituye una variable integradora importante, pero no representa por sí misma la complejidad climática de los sitios donde se encuentra la especie. De manera particular, la disponibilidad hídrica depende no solo de la precipitación anual, sino también de su distribución estacional, la evapotranspiración, las propiedades del suelo, la topografía y, en ambientes manejados, del aporte complementario de agua mediante riego.

Los resultados deben interpretarse como relaciones estadísticas entre las condiciones ambientales asociadas con los registros disponibles y no como evidencia de relaciones causales ni como delimitación de los requerimientos fisiológicos de la especie. Asimismo, debido a que la intensidad de muestreo varía entre localidades y provincias, los coeficientes obtenidos caracterizan la estructura de la base climática analizada y no deben extrapolarse automáticamente a todo el nicho potencial de *J. neotropica*.

En términos aplicados, la interacción entre altitud, temperatura y precipitación proporciona una base para orientar la caracterización ambiental de poblaciones, la selección de sitios para conservación y restauración y la planificación de nuevas plantaciones. Los registros establecidos bajo condiciones climáticas contrastantes adquieren especial interés para investigar posibles diferencias en crecimiento, fenología, regeneración y respuesta ecofisiológica. Esta variabilidad ambiental constituye además una referencia para el análisis de la exposición y vulnerabilidad de *J. neotropica* frente a escenarios de cambio climático desarrollado en los apartados posteriores.

5.3. Factores ecológicos

Además de los factores bioclimáticos, la distribución de *J. neotropica* está influenciada por las características edáficas y los ecosistemas donde se desarrolla. Los suelos determinan, entre otros aspectos, la disponibilidad de agua, nutrientes y el anclaje del sistema radical, mientras que los ecosistemas integran las condiciones climáticas, topográficas y bióticas que configuran el hábitat de la especie. El análisis conjunto de estos factores permite comprender los ambientes donde actualmente se registra *J. neotropica* y aporta criterios para la identificación de áreas prioritarias para la conservación, la restauración ecológica y el establecimiento de nuevas plantaciones.

5.3.1. Suelos

La distribución de *J. neotropica* en el Ecuador se encuentra asociada a una diversidad de órdenes de suelos propios de los Andes tropicales, cuya formación responde a la interacción entre el vulcanismo, la geología regional, el relieve y las condiciones climáticas. Estos factores determinan propiedades físicas y químicas que influyen en la disponibilidad de agua, el desarrollo radical y el establecimiento de la vegetación forestal.

Con base en la integración de los registros georreferenciados de presencia de la especie con la cartografía nacional de suelos (MAG–SIGTIERRAS, 2015; IGM, 2022), se identificó que *J. neotropica* se distribuye principalmente sobre **Andisoles (56 %)** e **Inceptisoles (28 %)**, mientras que **Ultisoles** y **Mollisoles** representan conjuntamente alrededor del **16 %** de los sitios analizados. De manera puntual también se registró la presencia de la especie sobre **Entisoles**, principalmente en zonas de transición hacia el piedemonte andino.

Los Andisoles predominan en las provincias del norte del Ecuador, especialmente en Carchi e Imbabura, donde se desarrollan sobre depósitos de cenizas volcánicas recientes. Estos suelos se caracterizan por su elevada capacidad de retención de agua, alto contenido de materia orgánica, buena estructura y adecuada profundidad efectiva, condiciones ampliamente reconocidas por favorecer el establecimiento de especies forestales de larga vida (Espinosa et al., 2022).

En las provincias del centro y sur andino, particularmente en Cotopaxi, Chimborazo y Loja, la especie también se encuentra sobre Inceptisoles y Ultisoles derivados de materiales coluviales y metamórficos. Aunque estos suelos presentan, en general, menor fertilidad natural y mayor acidez, las poblaciones de *J. neotropica* persisten en microambientes favorables asociados a quebradas húmedas, laderas con influencia de neblina y sitios con buena profundidad efectiva del suelo.

En conjunto, estos resultados indican que la distribución de *J. neotropica* comprende un amplio espectro de condiciones edáficas dentro de los Andes ecuatorianos. Sin embargo, la mayor concentración de registros sobre Andisoles e Inceptisoles coincide con regiones donde predominan suelos bien drenados, con elevada capacidad de almacenamiento de agua y abundante materia orgánica, características que probablemente contribuyen a generar condiciones favorables para el establecimiento y desarrollo de la especie. No obstante, la información presentada corresponde a asociaciones espaciales

entre los registros de presencia y la cartografía edáfica nacional, por lo que no debe interpretarse como una demostración experimental de preferencia edáfica.

5.3.2. Condiciones edafoclimáticas y desarrollo dasométrico: estudio de caso en Yuyucocha

La caracterización nacional presentada en los apartados anteriores permite identificar los principales gradientes climáticos y condiciones edáficas asociados con la presencia de *J. neotropica* en Ecuador. Sin embargo, la comprensión de su respuesta estructural requiere complementar este enfoque espacial con información obtenida directamente en sitios donde se dispone simultáneamente de registros de clima, suelo y variables dasométricas. En este contexto, la evidencia generada en diferentes localidades del norte de los Andes ecuatorianos y los registros obtenidos en Yuyucocha permiten examinar estas relaciones a escala regional y local.

Guevara & Yépez (2026) evaluaron las propiedades edafológicas, dasométricas y fenotípicas de *J. neotropica* en cuatro sitios del norte de los Andes ecuatorianos, localizados en las provincias de Imbabura, Carchi, Pichincha y Napo. El estudio integró el análisis de propiedades físicas y químicas del suelo con mediciones de altura, diámetro a la altura del pecho (DAP) y diámetro de copa, permitiendo comparar la expresión estructural de la especie bajo diferentes condiciones ambientales.

Los resultados mostraron que las propiedades del suelo difieren entre sitios y mantienen asociaciones de distinta magnitud con las variables dasométricas. Entre las propiedades físicas, la porosidad y la humedad adquieren particular importancia por su relación con la aireación, infiltración y disponibilidad de agua para el sistema radicular. Asimismo, la materia orgánica interviene en procesos relacionados con la retención de humedad, estructura del suelo y disponibilidad de nutrientes, por lo que el desarrollo de la especie debe interpretarse a partir de la interacción entre diferentes componentes edáficos y no como respuesta a un único factor.

Esta evidencia regional proporciona un marco de referencia para interpretar los registros obtenidos en Yuyucocha. A diferencia del análisis comparativo entre sitios realizado por Guevara & Yépez (2026), la información disponible en este campus corresponde a árboles de diferentes edades y sistemas de establecimiento que comparten un mismo contexto geográfico. Por esta razón, Yuyucocha se analiza como un **estudio de caso**, cuyos resultados permiten caracterizar las condiciones locales bajo las cuales se desarrolla la especie, pero no establecer por sí solos sus requerimientos ecológicos óptimos.

Caracterización edafoclimática de Yuyucocha

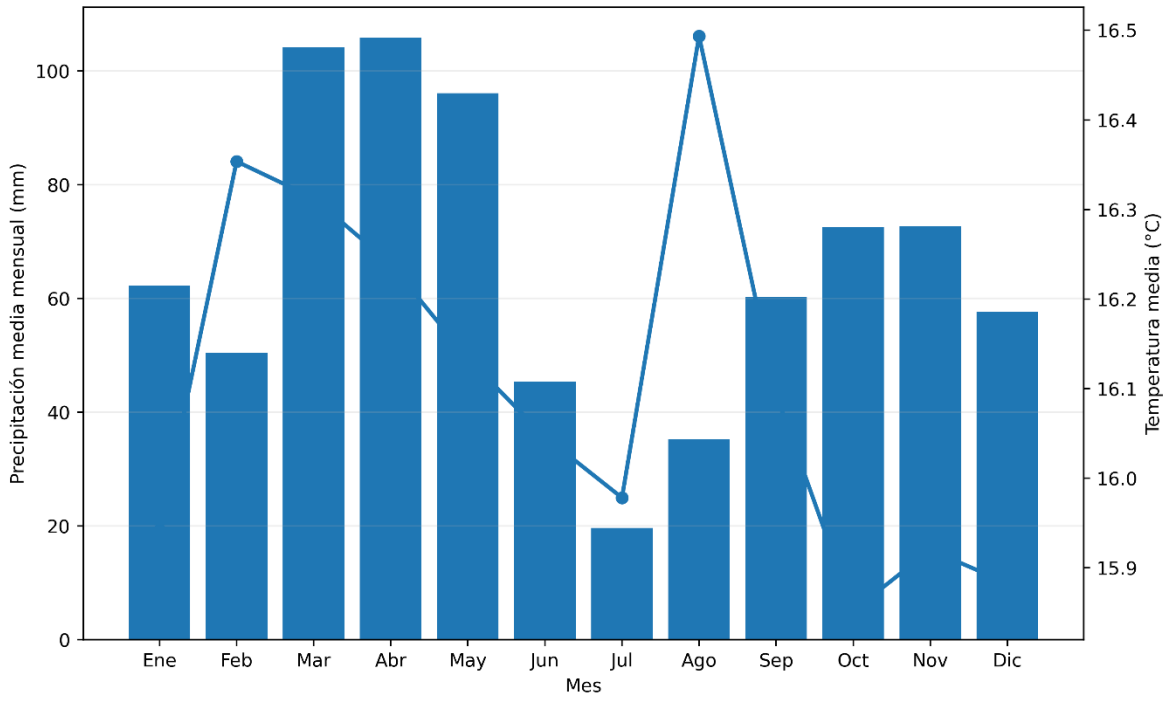
El Campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte constituye un sitio de especial interés para esta caracterización debido a la presencia de individuos de *J. neotropica* de diferentes edades y formas de establecimiento y, particularmente, a la disponibilidad de registros procedentes de una estación meteorológica localizada en el mismo sector. Esta proximidad permite caracterizar el clima reciente mediante observaciones instrumentales locales, reduciendo la incertidumbre asociada al empleo de estaciones meteorológicas distantes o de información climática interpolada.

Para el análisis se utilizaron los registros mensuales correspondientes al período **2015–2025**, conformado por 11 años completos y continuos. Durante este período, la temperatura media fue de **16,10 °C**, la humedad relativa media alcanzó **80,16 %** y la precipitación promedio anual fue de **782,36 mm**. Estos valores sitúan a Yuyucocha dentro del gradiente climático documentado previamente para la especie en Ecuador, particularmente en relación con el intervalo térmico de mayor concentración de registros, aunque su precipitación media se aproxima al límite inferior del intervalo pluviométrico donde se concentra una parte importante de las localidades analizadas en este capítulo. A escala nacional, la mayor concentración de registros se localizó entre 13 y 18 °C y entre 800 y 1 200 mm anuales.

La precipitación de Yuyucocha mostró, además, una marcada variabilidad interanual, con una desviación estándar de **239,31 mm** y un coeficiente de variación de **30,59 %**. El menor acumulado anual se registró en 2015, con **421,63 mm**, mientras que el mayor correspondió a 2021, con **1 197,12 mm**. Esta amplitud evidencia que la disponibilidad hídrica atmosférica varía considerablemente entre años y que el promedio anual, considerado aisladamente, no representa toda la variabilidad climática experimentada en el sitio. La distribución mensual de la precipitación y la temperatura durante el período analizado se presenta en la Figura 5.4.

Figura 5.4

Distribución mensual de la precipitación y temperatura media en Yuyucocha durante el período 2015–2025



Nota. Los valores corresponden a promedios mensuales calculados a partir de los años completos comprendidos entre 2015 y 2025. La precipitación se expresa en mm y la temperatura media en °C. Fuente: registros de la estación meteorológica de Yuyucocha, Universidad Técnica del Norte; procesamiento realizado en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

La caracterización climática fue complementada con el análisis físico-químico del suelo. El sitio presentó un **pH de 6,02**, una conductividad eléctrica de **0,260 mS/cm** y un contenido de materia orgánica de **0,97 %**. El análisis incluyó además N, P, S, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn y B. De acuerdo con la interpretación proporcionada por el laboratorio, varios de los elementos evaluados presentan niveles bajos, mientras que el azufre registra una condición alta. En conjunto, estos resultados caracterizan el sitio evaluado por una reacción ligeramente ácida, baja salinidad y reducido contenido de materia orgánica.

La condición observada en Yuyucocha resulta de interés al contrastarla con la caracterización general presentada en el apartado 5.3.1, donde la presencia de *J. neotropica* en Ecuador se asocia principalmente con Andisoles e Inceptisoles y, en numerosos sitios, con suelos de adecuada capacidad de almacenamiento de agua y contenidos importantes de materia orgánica. La existencia en Yuyucocha de árboles de diferentes edades bajo un contenido relativamente bajo de materia orgánica muestra que la especie puede desarrollarse también bajo condiciones edáficas que difieren de aquellas predominantes en parte de su distribución; sin embargo, este resultado no demuestra tolerancia fisiológica ni permite definir umbrales de aptitud edáfica.

Asimismo, debido a que la información del suelo disponible corresponde a una caracterización del sitio y no a muestras independientes asociadas a cada uno de los árboles evaluados, **no se establecieron correlaciones estadísticas entre las propiedades edáficas y las dimensiones individuales de los árboles**. En este análisis, las propiedades del suelo se utilizan exclusivamente para caracterizar el ambiente local de establecimiento.

Desarrollo dasométrico

La respuesta estructural de *J. neotropica* en Yuyucocha se caracterizó mediante el análisis de **63 árboles con edades comprendidas entre 4 y 50 años**, establecidos en plantación pura, sistemas agroforestales, linderos, cortinas rompevientos y como árboles aislados. Para cada individuo se consideraron el DAP, la altura total y el área de copa.

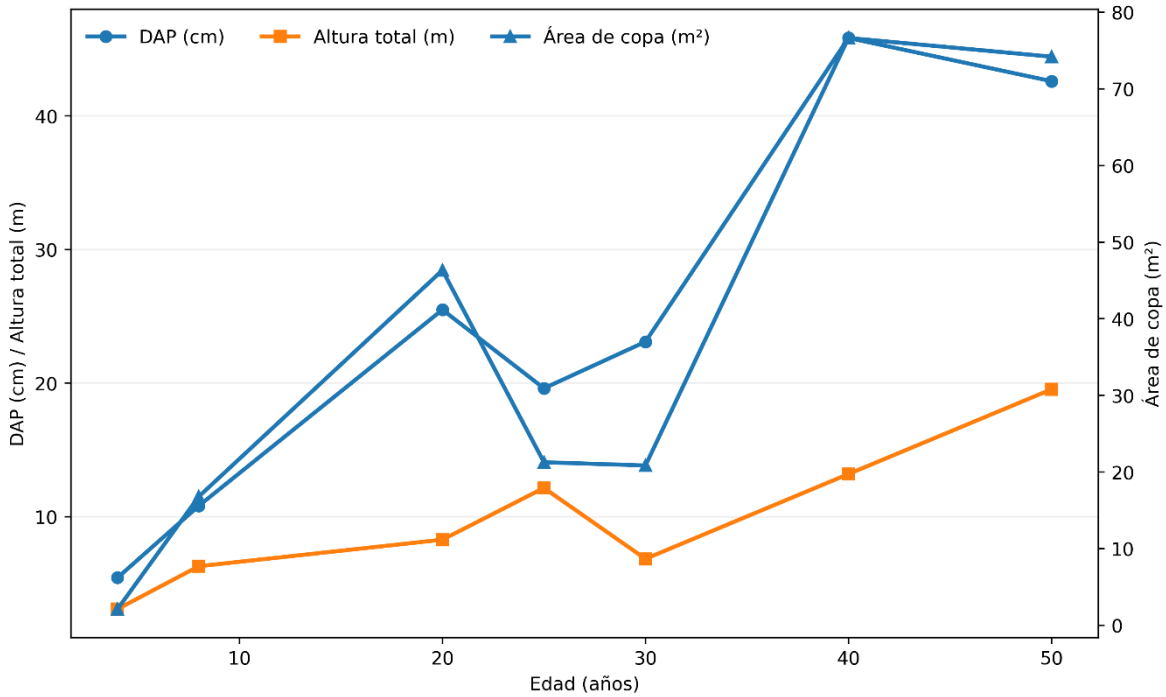
Los resultados evidenciaron asociaciones positivas entre la edad y las tres variables estructurales analizadas. La correlación entre edad y DAP fue de **r = 0,867**, mientras que entre edad y altura alcanzó **r = 0,769** y entre edad y área de copa **r = 0,728**. Estos resultados muestran que, en términos generales, los individuos de mayor edad presentan mayores dimensiones diamétricas, verticales y de copa.

Las propias variables dasométricas presentaron también asociaciones estrechas. La relación más elevada se observó entre **DAP y área de copa (r = 0,896)**, seguida por DAP y altura (**r = 0,781**) y altura y área de copa (**r = 0,769**). La fuerte asociación entre DAP y área de copa evidencia que la expansión del espacio aéreo ocupado por el árbol acompaña estrechamente el desarrollo diamétrico del fuste, relación de interés para comprender la arquitectura y ocupación del espacio de la especie bajo diferentes formas de establecimiento.

Al comparar grupos de edad se observa igualmente una marcada diferenciación estructural. Los árboles de cuatro años establecidos en plantación pura presentaron un DAP promedio de **5,44 cm** y una altura media de **3,10 m**. Los individuos de 25 años presentes en sistemas agroforestales alcanzaron aproximadamente **19,61 cm de DAP y 12,16 m de altura**, mientras que los árboles de 50 años establecidos en lindero registraron

valores medios de **42,60 cm de DAP y 19,54 m de altura**. La trayectoria observada para DAP, altura total y área de copa se presenta en la Figura 5.5.

Figura 5.5
Desarrollo dasométrico de Juglans neotropica en diferentes edades y condiciones de establecimiento en Yuyucocha



Nota. Los valores representan promedios de DAP, altura total y área de copa correspondientes a 63 árboles de *J. neotropica* con edades entre 4 y 50 años, establecidos en plantación pura, sistemas agroforestales, linderos, cortinas rompevientos y como árboles aislados. Las edades no se encuentran representadas de manera equivalente en todos los sistemas de establecimiento; por tanto, la figura describe tendencias estructurales observadas y no constituye una curva experimental de crecimiento ni permite atribuir las diferencias exclusivamente al sistema de establecimiento. Fuente: Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), Universidad Técnica del Norte.

La interpretación de estas diferencias requiere considerar que la edad y el sistema de establecimiento no constituyen factores independientes dentro de la base analizada. En consecuencia, las dimensiones observadas pueden responder simultáneamente a la edad, disponibilidad de espacio, competencia, manejo, condiciones microambientales y características individuales de los árboles. Por esta razón, los valores correspondientes a las distintas edades **no deben interpretarse como una cronosecuencia experimental**.

El incremento medio anual acumulado presentó una asociación negativa con la edad, tanto para el diámetro (**r = –0,641**) como para la altura (**r = –0,788**). Estos indicadores fueron calculados como la relación entre la dimensión observada y la edad y corresponden, por tanto, a incrementos medios acumulados y no a incrementos corrientes obtenidos mediante mediciones sucesivas de los mismos árboles. En consecuencia, su comportamiento permite comparar el crecimiento promedio alcanzado por unidad de tiempo, pero no determinar directamente la dinámica anual del crecimiento ni atribuir sus variaciones a años climáticamente secos o húmedos.

Interpretación ecológica

La integración de la información disponible permite caracterizar a Yuyucocha como un sitio donde *J. neotropica* se desarrolla bajo una temperatura media cercana a **16 °C**, precipitación promedio anual próxima a **782 mm**, humedad relativa alrededor de **80 %** y un suelo ligeramente ácido, de baja salinidad y reducido contenido de materia orgánica. Bajo estas condiciones se encuentran árboles de diferentes edades y formas de establecimiento que muestran un aumento consistente del DAP, altura y área de copa con la edad.

Los resultados de Yuyucocha y la evidencia regional de Guevara & Yépez (2026) son complementarios, aunque corresponden a escalas y diseños diferentes. El estudio regional permite reconocer variaciones entre sitios y asociaciones entre propiedades físico-químicas del suelo y variables dasométricas, mientras que Yuyucocha documenta la expresión estructural de árboles de diferentes edades y sistemas de establecimiento dentro de un mismo contexto ambiental. En conjunto, ambas fuentes respaldan una interpretación multivariable del desarrollo de *J. neotropica*, en la que intervienen las condiciones edáficas, disponibilidad hídrica, ambiente climático, edad, competencia y manejo, además de la variabilidad propia de los individuos.

Esta interpretación es consistente con el enfoque adoptado para el nicho ecológico de la especie en este capítulo, donde la distribución nacional se explica por la interacción entre altitud, temperatura, precipitación y condiciones locales, y no por el efecto aislado de una sola variable. Yuyucocha aporta, en este sentido, una escala complementaria de observación: mientras la base nacional —con 42 sitios seleccionados para la representación cartográfica y 81 registros con información bioclimática completa para el análisis estadístico— permite reconocer la amplitud ambiental documentada de la especie en Ecuador, el estudio local muestra cómo se expresa estructuralmente una población establecida dentro de una combinación específica de condiciones edafoclimáticas.

Desde una perspectiva aplicada, los registros de Yuyucocha constituyen una **referencia local** sobre las condiciones bajo las cuales *J. neotropica* ha logrado establecerse y desarrollar individuos de hasta 50 años. Esta información puede contribuir a la evaluación de sitios destinados a conservación, restauración, sistemas agroforestales y plantaciones. Sin embargo, los valores observados **no representan requerimientos óptimos ni límites ecológicos de la especie**. La definición de rangos de aptitud requiere contrastar poblaciones y plantaciones distribuidas a lo largo de gradientes edáficos y climáticos más amplios y, particularmente, disponer de mediciones repetidas que permitan separar los efectos de edad, sitio, manejo, clima y procedencia.

5.3.3. Ecosistemas

La distribución de *J. neotropica* en el Ecuador se encuentra estrechamente asociada a los ecosistemas montanos de la cordillera de los Andes, donde convergen condiciones favorables de altitud, temperatura, precipitación y suelos. Estos ecosistemas constituyen el principal hábitat de la especie y reflejan la interacción de factores climáticos, geológicos y topográficos que caracterizan los Andes tropicales.

Con base en el Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental (MAE, 2013) y en el análisis de los registros de presencia considerados en este estudio, la mayor parte de los registros de *J. neotropica* se asocia con bosques

siempreverdes montanos bajos y montanos bajos y montanos, distribuidos tanto en la cordillera Occidental como en la cordillera Oriental, así como en bosques montanos del sur andino y, en menor proporción, en mosaicos de bosques y arbustales semideciduos presentes en algunos valles interandinos (Tabla 5.1).

Tabla 5.1

Ecosistemas del Ecuador continental asociados con los registros de Juglans neotropica

Región / Provincia Biogeográfica	Sector Biogeográfico	Ecosistema predominante	Código MAE (2013)	Altitud (m)	Características ecológicas
Andes del Norte	Cordillera Occidental	Bosque siempreverde montano bajo de Cordillera Occidental.	BsBn04	1 800–2 400	Bosque húmedo, suelos andosoles profundos, alta cobertura arbórea, neblina frecuente.
Andes del Norte	Norte de la Cordillera Oriental	Bosque siempreverde montano del Norte de la Cordillera Oriental.	BsMn01	2 000–2 800	Vegetación densa, clima pluvial, presencia de *Cedrela montana*, *Podocarpus oleifolius*, *J. neotropica.*
Andes del Sur	Catamayo–Alamor	Bosque siempreverde montano bajo del Catamayo–Alamor.	BsBn05	1 800–2 200	Bosques húmedos mixtos con relictos de nogal; suelos de textura media, pendientes moderadas.
Andes del Sur	Catamayo–Alamor	Bosque siempreverde montano alto del Catamayo–Alamor.	BsAn04	2 900–3 400	Alta nubosidad, abundante epifitismo, temperaturas medias anuales de 12–15 °C.
Andes	Valles interandinos (norte y sur)	Bosque y arbustal semideciduo montano bajo y montano.	BmMn01 / BmBn02	1 700–2 300	Bosques secundarios y relictos, con mosaicos agroforestales donde el nogal persiste como especie nativa o cultivada.

Nota. Elaboración propia con base en el Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental (MAE, 2013), complementada con el análisis de los registros de *J. neotropica* considerados en este estudio. La caracterización ecológica integra información descrita por MAE (2013) y observaciones derivadas del análisis de los sitios de presencia de la especie.

Distribución en los ecosistemas andinos

Los registros de presencia muestran que *J. neotropica* se distribuye principalmente en ambientes asociados con la cordillera de los Andes, a lo largo de un gradiente altitudinal amplio que comprende desde las estribaciones andinas hasta pisos montanos altos. Esta amplitud se expresa también en condiciones climáticas contrastantes, desde sectores interandinos relativamente secos hasta ambientes húmedos de las vertientes externas de la cordillera. En consecuencia, la presencia de la especie no se restringe a un único tipo de ecosistema ni a condiciones uniformes de humedad y temperatura.

En los ecosistemas forestales, *J. neotropica* se encuentra asociada principalmente con bosques montanos y remanentes de vegetación andina, aunque las condiciones ambientales varían regionalmente. En el norte y centro del país, los registros comprenden tanto valles interandinos como vertientes occidentales y orientales, mientras que hacia el sur se documenta su presencia en bosques y relictos forestales de Loja y Zamora Chinchipe. Esta distribución refleja la heterogeneidad topográfica, climática y edáfica que caracteriza a los Andes ecuatorianos.

Dentro de este contexto austral destaca la Reserva Natural El Tundo, en el cantón Sozoranga, provincia de Loja, donde se conserva un bosque natural de *J. neotropica* (Desarrollo Forestal Campesino en los Andes del Ecuador, 1998). Entre las localidades estudiadas en el sur del Ecuador, El Tundo presentó los mayores valores medios de DAP, altura y volumen individual, lo que evidencia el notable desarrollo estructural que puede alcanzar la especie en condiciones naturales (Palacios-Herrera et al., 2023). Por estas características, El Tundo constituye una localidad de especial interés para el estudio de la estructura, ecología, regeneración natural y conservación de *J. neotropica* en el sur del Ecuador.

Además de los ecosistemas naturales, la especie está presente en una diversidad de ambientes intervenidos. Se registra en sistemas agroforestales, árboles dispersos, remanentes boscosos, áreas con regeneración natural y plantaciones establecidas con fines de conservación, restauración, producción e investigación. Asimismo, su presencia ha sido documentada en huertos y arbolado urbano. Esta diversidad de contextos muestra que la distribución actual de *J. neotropica* comprende tanto ecosistemas forestales como paisajes productivos y urbanos donde persisten condiciones que permiten su establecimiento y desarrollo.

Interpretación ecológica

La presencia de *J. neotropica* en diferentes ecosistemas y condiciones de manejo confirma su estrecha vinculación biogeográfica con los Andes, pero también evidencia que su distribución actual no puede explicarse exclusivamente por su asociación con bosques siempreverdes montanos. La especie persiste bajo diferentes grados de transformación del paisaje, desde remanentes de bosque natural hasta sistemas agroforestales y ambientes manejados. Esta condición resalta la importancia de considerar conjuntamente la conservación de poblaciones naturales y el papel complementario que pueden desempeñar los paisajes intervenidos para el mantenimiento de la especie.

Los registros actualizados muestran una distribución altitudinal documentada que se extiende desde **905 m s. n. m. en la parroquia Jijón y Caamaño, cantón Mira, provincia Carchi, hasta 3 091 m s. n. m. en Cañar**. La Figura 5.6 muestra el ejemplar registrado en Piñas Grande, cantón Piñas, provincia El Oro. Esta amplitud, conjuntamente con la variación térmica y pluviométrica descrita en los apartados anteriores, evidencia que *J. neotropica* está presente bajo condiciones ambientales contrastantes. Sin embargo, estos extremos corresponden a la distribución observada y no deben interpretarse como límites fisiológicos ni como delimitación definitiva del nicho potencial de la especie.

Figura 5.6

Ejemplar joven de Juglans neotropica junto a un curso de agua en Piñas Grande, El Oro

Nota. Ejemplar registrado a 1 166 m s. n. m. en la parroquia urbana Piñas Grande, cantón Piñas. En su entorno inmediato se observan cítricos y plantas de plátano (*Musa* sp.).

La correspondencia entre los registros de presencia y los ecosistemas reconocidos para Ecuador permite contextualizar ecológicamente la distribución de *J. neotropica*, pero debe interpretarse considerando la transformación histórica del paisaje y la presencia actual de la especie fuera de remanentes naturales. Por ello, la clasificación de

ecosistemas constituye una referencia importante para identificar áreas de conservación y restauración, aunque debe complementarse con información sobre clima, suelo, conectividad del paisaje, estado de las poblaciones y formas de manejo (MAE & FAO, 2015).

En conjunto, el análisis evidencia que la distribución de *J. neotropica* responde a la interacción entre factores climáticos, edáficos, topográficos y de paisaje. Esta diversidad ambiental y de contextos de presencia proporciona una base ecológica para identificar áreas prioritarias de conservación, orientar acciones de restauración y evaluar la representatividad de las poblaciones de la especie a lo largo de los Andes ecuatorianos.

5.4. Estado de conservación

J. neotropica es una de las especies forestales nativas de mayor preocupación para la conservación en los Andes tropicales debido a la reducción y fragmentación de sus poblaciones naturales. Su distribución actual se caracteriza por la presencia de relictos boscosos aislados, árboles dispersos y poblaciones de tamaño variable inmersas en una matriz de paisajes agrícolas y ganaderos, situación que limita la conectividad ecológica y compromete la regeneración natural de la especie.

A escala global, la **International Union for Conservation of Nature (IUCN)** clasifica a *J. neotropica* en la categoría **En Peligro (Endangered, EN)**, bajo los criterios A1acd+2cd, debido principalmente a la reducción de su hábitat y al aprovechamiento de su madera; no obstante, esta evaluación fue publicada en 1998 y actualmente consta como pendiente de actualización (Americas Regional Workshop, 1998). En el ámbito nacional, el **Sistema de Información de Biodiversidad del Ecuador (SiB-Ec)** registra a la especie como **no evaluada (NE) en la Lista Roja Ecuador**, mientras que consigna su categoría **En Peligro (EN) en la Lista Roja de la UICN** (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE], s. f.).

La conservación de *J. neotropica* en Ecuador comprende, además, mecanismos de protección *in situ* y de regulación de su aprovechamiento. El SiB-Ec registra la presencia de la especie en **Cayambe Coca, Cordillera Oriental del Carchi y Cotopaxi**, por lo que la protección de los ecosistemas comprendidos en estas áreas contribuye indirectamente a la conservación *in situ* de la especie (MAATE, s. f.). Complementariamente, la **Norma para el Manejo Sustentable de los Bosques Andinos** incluye a *J. neotropica* entre las **especies de aprovechamiento condicionado** y establece para ella un diámetro mínimo de corta de **50 cm** (MAE, 2006).

Los resultados presentados en este capítulo muestran que, aunque *J. neotropica* mantiene una distribución relativamente amplia en términos geográficos, su presencia se concentra en poblaciones fragmentadas y de extensión variable. En varias provincias predominan relictos de bosque con regeneración natural limitada, mientras que en otras la especie persiste principalmente en sistemas agroforestales, árboles aislados o plantaciones establecidas con fines de conservación, restauración e investigación. Este patrón evidencia que la permanencia de la especie depende cada vez más de paisajes multifuncionales donde coexisten remanentes naturales y sistemas productivos.

Las principales amenazas identificadas para *J. neotropica* incluyen la transformación de los bosques montanos por expansión agrícola y ganadera, la extracción selectiva de madera, la fragmentación del hábitat, la disminución de la conectividad entre poblaciones y, potencialmente, los efectos derivados del cambio climático sobre la distribución de sus condiciones ambientales favorables. La combinación de estos factores incrementa el riesgo de reducción poblacional y limita los procesos naturales de regeneración y dispersión.

Desde una perspectiva de conservación, estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de fortalecer estrategias complementarias de conservación *in situ* y *ex situ*. La protección de las poblaciones naturales debe acompañarse del establecimiento de corredores ecológicos, la restauración de bosques montanos, el enriquecimiento de remanentes forestales, la conservación de recursos genéticos y el fortalecimiento de programas de investigación y monitoreo a largo plazo. Asimismo, la presencia de *J. neotropica* en sistemas agroforestales y plantaciones representa una oportunidad para integrar la conservación de la especie dentro de paisajes productivos, contribuyendo simultáneamente a la restauración ecológica y al manejo forestal sostenible.

5.5. Modelación de la distribución potencial en Imbabura

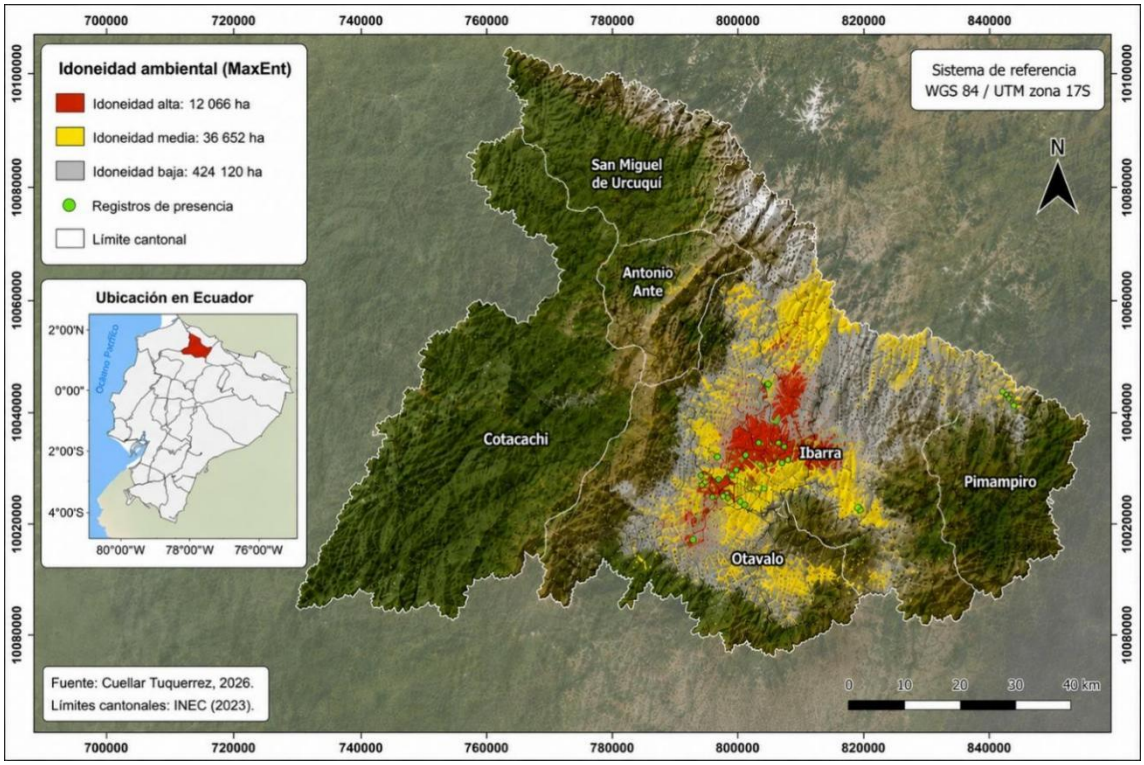
Un análisis reciente realizado en la provincia de Imbabura permitió estimar la distribución potencial de *J. neotropica* mediante el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt). La modelación se sustentó inicialmente en 152 registros de presencia, sometidos a depuración espacial y controles de calidad de la georreferenciación. Posteriormente, se seleccionaron 39 registros, de los cuales el 75 % se destinó al entrenamiento del modelo y el 25 % a su validación (Cuellar Tuquerrez, 2026).

El modelo integró variables climáticas, topográficas, edáficas y de cobertura del terreno. Las variables climáticas procedieron de WorldClim 2.1 y correspondieron al período de referencia 1970–2000. El modelo alcanzó un AUC de 0,90 y permitió identificar áreas con diferentes grados de idoneidad ambiental para la especie. Las zonas de idoneidad ambiental media y alta se concentraron principalmente en la Hoya de Ibarra y otros sectores de los valles interandinos de la provincia, mientras que la idoneidad disminuyó progresivamente hacia sectores de mayor altitud (Cuellar Tuquerrez, 2026).

Entre las variables analizadas, la temperatura mostró una contribución importante a la distribución potencial, con condiciones favorables dentro del interval de 14–18 °C. Asimismo, las curvas de respuesta del modelo señalaron una elevada idoneidad entre 2 320 y 2 441 m s. n. m. Estos resultados proporcionan una aproximación espacial complementaria a los registros de presencia de la especie y permiten identificar sectores de interés para la evaluación de acciones de conservación, restauración y establecimiento de *J. neotropica* en Imbabura (Cuellar Tuquerrez, 2026) (Figura 5.7).

Figura 5.7

Idoneidad ambiental potencial para Juglans neotropica en la provincia de Imbabura estimada mediante MaxEnt.



Nota. La idoneidad ambiental fue estimada mediante MaxEnt a partir de registros depurados de presencia y variables climáticas, topográficas, edáficas y de cobertura del terreno. Fuente: Cuellar Tuquerrez (2026).

Esta modelación representa condiciones de idoneidad ambiental a escala provincial y constituye un análisis complementario a la evaluación de los cambios potenciales de idoneidad climática a escala nacional presentada en la sección siguiente.

Un trabajo de campo reciente del programa *Juglans* registró 86 árboles de *J. neotropica* en 26 fichas levantadas en la provincia de Loja y en Valladolid, Zamora Chinchipe. Los árboles observados se encontraban entre 1 488 y 2 685 m de altitud, en bosques nativos, áreas de protección hídrica, sistemas agroforestales, potreros y linderos; también se observó regeneración natural en varios sitios de Loja. Estos registros amplían la documentación de campo sobre la presencia y el manejo del nogal en el sur del Ecuador y señalan sitios de interés para evaluar, en futuras investigaciones, los posibles cambios en su idoneidad climática.

5.6 Cambio climático, vulnerabilidad e implicaciones para la conservación, restauración y manejo de *J. neotropica* en Ecuador

El cambio climático constituye un factor creciente de presión sobre las especies forestales andinas debido a las modificaciones de los regímenes térmicos e hídricos y a sus efectos sobre la distribución, fenología, crecimiento y reproducción. En especies de distribución montana como *J. neotropica*, estos cambios adquieren especial importancia

por la heterogeneidad ambiental de los Andes y por la fragmentación de muchas de sus poblaciones.

5.6.1 Evidencias de cambios climáticos en poblaciones de *J. neotropica*

En el sur del Ecuador existen evidencias recientes de modificaciones climáticas en localidades donde se conservan poblaciones naturales y naturalizadas de *J. neotropica*. Palacios-Herrera et al. (2025b), al estudiar seis localidades de Loja y Zamora Chinchipe, reportaron para las últimas dos décadas un **incremento de 1,5 °C en la temperatura y una disminución del 22 % en la precipitación**, cambios asociados con modificaciones del balance edafoclimático de los sitios estudiados.

Estos resultados adquieren particular relevancia debido a la amplitud ambiental y biológica representada por las poblaciones evaluadas. El estudio incluyó más de 2 000 individuos y registró edades estimadas entre 11 y 355 años, además de diferencias significativas de crecimiento entre localidades. Los autores interpretan esta variabilidad como evidencia de una marcada plasticidad fenotípica y capacidad de respuesta de la especie frente a gradientes climáticos, edáficos y topográficos.

La respuesta de *J. neotropica* frente al cambio climático, sin embargo, no debe interpretarse únicamente a partir de variaciones en temperatura y precipitación. Las poblaciones del sur del Ecuador ocupan condiciones contrastantes de altitud, humedad, suelo y pendiente, y los patrones fenológicos varían entre localidades. El estudio señala, además, que la estructura de edades y las características edáficas pueden contribuir a modular la respuesta de las poblaciones frente a la variabilidad ambiental.

5.6.2 Escenarios climáticos futuros

Las proyecciones climáticas de CMIP6 permiten analizar posibles cambios futuros bajo diferentes trayectorias socioeconómicas y de emisiones. WorldClim 2.1 proporciona proyecciones climáticas reducidas espacialmente y corregidas respecto de su climatología de referencia para cuatro escenarios —SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5— y para los períodos 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 y 2081–2100.

Para evaluar la respuesta potencial de J. neotropica en Ecuador se consideraron los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0, que representan trayectorias contrastantes de forzamiento climático. SSP2-4.5 corresponde a un escenario intermedio, mientras SSP3-7.0 representa condiciones de mayores emisiones y calentamiento. Esta selección permite examinar la sensibilidad espacial de la especie frente a dos trayectorias climáticas plausibles sin asumir que una de ellas constituye una predicción determinista del clima futuro. El IPCC (2021), proyecta un calentamiento global medio para 2081–2100 de aproximadamente 2,9 °C bajo SSP2-4.5 y 3,9 °C bajo SSP3-7.0 respecto de 1850–1900, aunque con rangos de incertidumbre importantes.

Para ambos escenarios se utilize el modelo MRI-ESM2-0 y el horizonte 2041–2060, de manera que las diferencias espaciales obtenidas reflejan principalmente el contraste entre las dos trayectorias climáticas consideradas y no la variabilidad entre diferentes modelos de circulación global.

5.6.3 Cambios potenciales en la idoneidad climática de *J. neotropica* en Ecuador

Con el propósito de explorar la posible respuesta espacial de *J. neotropica* frente al cambio climático, se realizó una modelación a escala del Ecuador continental utilizando como referencia las condiciones climáticas de WorldClim 2.1 para 1970–2000 y proyecciones del modelo climático MRI-ESM2-0 para 2041–2060 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. El análisis utilizó las variables temperatura media anual (BIO1), estacionalidad de la temperatura (BIO4), precipitación anual (BIO12) y estacionalidad de la precipitación (BIO15), a una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km). Después de la depuración y reducción de la redundancia espacial de los registros de presencia, se utilizaron 56 celdas climáticamente independientes para la modelación. Para discriminar las áreas climáticamente favorables se adoptó como referencia el percentil 10 de la idoneidad estimada en los sitios de presencia (P10 = 0,7301).

Las proyecciones muestran una modificación apreciable de la disponibilidad espacial de condiciones climáticas favorables. Para el período de referencia se estimaron aproximadamente **5 481,4 km²** de alta idoneidad climática, superficie que disminuyó a **3 496,3 km² bajo SSP2-4.5** y a **3 848,5 km² bajo SSP3-7.0**. Estas variaciones equivalen a reducciones aproximadas de **36,2 % y 29,8 %**, respectivamente, respecto de la línea base. A escala del Ecuador continental, el modelo MRI-ESM2-0 proyectó además un incremento medio de la temperatura anual de aproximadamente **1,54 °C bajo SSP2-4.5 y 1,67 °C bajo SSP3-7.0**, mientras que la precipitación anual mostró cambios medios menores y espacialmente heterogéneos, de aproximadamente **−3,8 y −29,2 mm/año**, respectivamente.

La comparación espacial conjunta entre el período de referencia y ambos escenarios futuros permitió diferenciar cuatro respuestas. Aproximadamente **2 424,5 km²** conservaron condiciones favorables en el presente y bajo las dos proyecciones futuras fueron clasificados como áreas de **persistencia de idoneidad**. Alrededor de **2 513,6 km²** correspondieron a áreas actualmente favorables que perdieron esta condición bajo ambos escenarios, mientras que **649,6 km²** representaron sectores que adquirieron condiciones favorables en las dos proyecciones y fueron clasificados como **ganancia potencial de idoneidad**. Finalmente, **1 196,5 km²** presentaron una **respuesta divergente**, es decir, la clasificación futura difirió entre SSP2-4.5 y SSP3-7.0.

Este patrón evidencia que la respuesta potencial de *J. neotropica* al cambio climático no sería espacialmente uniforme. Aunque ambos escenarios muestran una reducción neta de la superficie climáticamente favorable, simultáneamente se identifican sectores de persistencia, pérdida y ganancia potencial a lo largo de la región andina. Por tanto, el cambio climático no debe interpretarse únicamente como una contracción

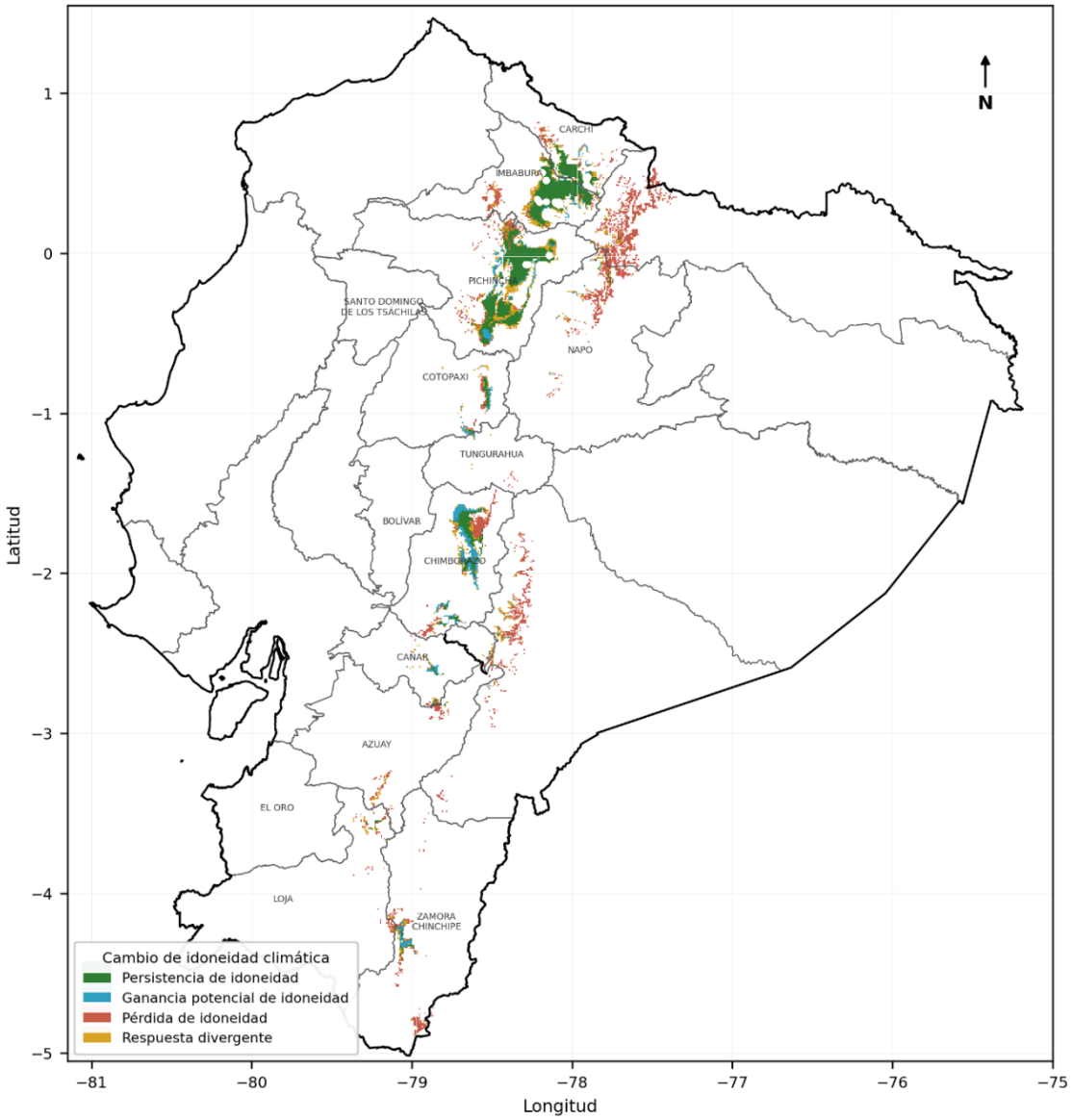
generalizada de la idoneidad, sino también como una posible reorganización espacial de las condiciones climáticas asociadas con la presencia de la especie.

Particularmente relevantes son las áreas identificadas como **ganancia potencial de idoneidad**, que representan territorios donde las condiciones climáticas futuras se aproximarían a aquellas asociadas con la presencia actual de *J. neotropica*. Estas áreas amplían el espacio geográfico que podría considerarse en futuras evaluaciones de conservación, restauración y establecimiento de la especie. Sin embargo, **no deben interpretarse directamente como áreas aptas para plantación**, debido a que la modelación representa fundamentalmente la dimensión climática del hábitat.

La idoneidad efectiva de un sitio depende también de factores edáficos, topográficos, hidrológicos, de cobertura y uso del suelo, conectividad del paisaje e interacciones biológicas. Esta precaución resulta particularmente importante para *J. neotropica*, cuya respuesta fenotípica ha mostrado variaciones relacionadas con el clima, las propiedades del suelo y la topografía en poblaciones del sur del Ecuador (Palacios-Herrera et al., 2025b). Por consiguiente, las zonas de ganancia potencial identificadas mediante la modelación deben considerarse **áreas prioritarias para evaluación de campo**, y no recomendaciones directas de establecimiento. La distribución espacial de estas categorías bajo los escenarios analizados se presenta en la Figura 5.8.

Figura 5.8

Cambios potenciales en la idoneidad climática de Juglans neotropica en Ecuador bajo escenarios de cambio climático



Nota. Proyección para 2041–2060 con el modelo MRI-ESM2-0 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0, respecto del período de referencia 1970–2000. La persistencia indica áreas que mantienen idoneidad climática bajo ambos escenarios; la ganancia potencial, áreas que adquieren idoneidad; la pérdida, áreas que dejan de ser idóneas; y la respuesta divergente, sectores donde los escenarios no coinciden. Las categorías representan idoneidad climática y no aptitud integral para plantación. Fuente cartográfica: INEC (2023); datos climáticos: WorldClim 2.1.

La comparación entre los escenarios permite, además, identificar territorios cuya clasificación se mantiene bajo diferentes condiciones climáticas futuras y otros cuya respuesta presenta mayor variabilidad. Esta diferenciación resulta útil para reconocer posibles **refugios climáticos**, áreas de mayor vulnerabilidad y sectores que podrían

adquirir importancia para la conectividad futura de las poblaciones. La interpretación debe realizarse, no obstante, dentro de los límites propios de los modelos climáticos y de distribución, por lo que estos resultados representan escenarios potenciales y no predicciones exactas de la distribución futura de la especie.

5.6.4 Orientaciones para el manejo adaptativo

La integración de la evidencia climática observada y de la modelación espacial futura permite plantear una estrategia de conservación de *J. neotropica* basada en la heterogeneidad ambiental y en la capacidad diferencial de respuesta de sus poblaciones. Las áreas donde la idoneidad climática se mantiene bajo los diferentes escenarios pueden constituir territorios prioritarios para la conservación *in situ*, especialmente cuando coinciden con poblaciones naturales, remanentes de bosque o zonas que mantienen conectividad con otros hábitats andinos.

Las áreas con pérdida potencial de idoneidad requieren una consideración particular, debido a que las poblaciones existentes podrían experimentar progresivamente condiciones climáticas menos semejantes a las que caracterizan su nicho actual. En estos sectores, el mantenimiento de cobertura forestal, la conectividad, la disponibilidad hídrica y la reducción de otras presiones antrópicas pueden contribuir a aumentar la capacidad de respuesta de las poblaciones.

Por su parte, las áreas de ganancia potencial de idoneidad ofrecen una perspectiva diferente para la restauración y el manejo futuro. Su identificación permite orientar **evaluaciones de campo y ensayos experimentales** destinados a determinar si las condiciones climáticas potencialmente favorables coinciden con características edáficas, topográficas y ecológicas apropiadas. La selección de procedencias adquiere aquí especial importancia, debido a la variabilidad fenotípica observada entre poblaciones de *J. neotropica* y a su posible relación con la adaptación local.

En este sentido, Palacios-Herrera et al. (2025b) recomiendan desarrollar ensayos silvícolas con procedencias contrastantes para evaluar su desempeño estructural y fenológico e identificar materiales con mayor plasticidad adaptativa para programas de reforestación y conservación. Los autores plantean igualmente la necesidad de combinar monitoreo de largo plazo, sensores microclimáticos, estudios ecofisiológicos y simulaciones bajo diferentes escenarios climáticos para establecer umbrales de tolerancia y evaluar posibles desplazamientos altitudinales.

En conjunto, estos resultados sugieren que la conservación de *J. neotropica* frente al cambio climático requiere trascender una visión estática de su distribución actual. La permanencia de poblaciones existentes, la protección de áreas climáticamente estables, el mantenimiento o recuperación de corredores, la evaluación de territorios con ganancia potencial de idoneidad y la selección de material genético apropiado constituyen componentes complementarios de una estrategia de **manejo adaptativo** para la especie.

5.7. Implicaciones para la conservación y restauración

La información presentada a lo largo de este capítulo evidencia que la distribución de *J. neotropica* en Ecuador responde a la interacción entre factores geográficos,

climáticos, edáficos y de paisaje. La amplitud ambiental documentada y la diversidad de contextos en los que actualmente se encuentra la especie proporcionan elementos para orientar estrategias de conservación, restauración ecológica y manejo sostenible, considerando tanto las poblaciones naturales como su presencia en paisajes transformados.

En este contexto, el valor de *J. neotropica* para la conservación y restauración no radica únicamente en su condición de especie forestal nativa, sino también en su presencia a lo largo de diferentes ambientes andinos y en su capacidad para integrarse en bosques, sistemas agroforestales, plantaciones y otros espacios manejados. Estas características permiten considerar a la especie dentro de estrategias que articulen conservación de poblaciones, recuperación de cobertura arbórea, conectividad del paisaje y usos productivos compatibles con la conservación.

5.7.1. *J. neotropica* como especie de integración biogeográfica

La distribución documentada de *J. neotropica* se extiende a lo largo de la cordillera de los Andes ecuatorianos e incluye valles interandinos, laderas internas y estribaciones occidentales y orientales. Los registros actualizados comprenden un gradiente altitudinal aproximado entre **905 y 3 091 m s. n. m.**, desde sectores de menor elevación asociados con las estribaciones andinas hasta ambientes montanos altos.

Esta amplitud sitúa a *J. neotropica* en una diversidad de contextos ecológicos y geográficos, incluyendo bosques y remanentes naturales, áreas con regeneración natural y paisajes modificados por actividades humanas. Desde una perspectiva biogeográfica, este patrón permite reconocer a la especie como un componente ampliamente distribuido de los paisajes andinos ecuatorianos y resalta la importancia de conservar poblaciones representativas de diferentes regiones y condiciones ambientales.

La conservación de esta variabilidad geográfica adquiere especial relevancia porque las poblaciones situadas bajo condiciones ambientales contrastantes pueden contener componentes diferentes de la diversidad ecológica y genética de la especie. No obstante, la existencia de registros a lo largo del gradiente no implica por sí misma conectividad funcional entre poblaciones, aspecto que requiere considerar distancias, fragmentación del paisaje, mecanismos de dispersión y flujo génico.

La dispersión constituye, en este contexto, un proceso relevante para comprender la regeneración y la conectividad entre individuos y poblaciones. En especies del género *Juglans*, los frutos y nueces pueden ser transportados por animales, particularmente aquellos que los consumen, almacenan o movilizan, mientras que en determinados ambientes el agua puede contribuir a su desplazamiento (Stone, 1993; Woeste y Michler, 2011). Para *J. neotropica*, la importancia relativa de estos mecanismos bajo las condiciones de los Andes ecuatorianos requiere todavía una mayor documentación.

5.7.2. Conectividad ecológica y restauración del paisaje

La distribución actual de *J. neotropica* evidencia que la especie no se restringe a bosques naturales. También está presente en remanentes forestales, áreas con regeneración natural, sistemas agroforestales, árboles dispersos, plantaciones y otros

ambientes manejados. Esta diversidad de contextos proporciona oportunidades para incorporar la especie en estrategias de restauración que trasciendan los límites de las áreas de bosque remanente.

En paisajes fragmentados, la conservación de árboles existentes, la regeneración natural y el establecimiento planificado de *J. neotropica* pueden **contribuir a incrementar la cobertura arbórea y complementar estructuras de conectividad** entre remanentes de vegetación. Los sistemas agroforestales y otros arreglos productivos con árboles adquieren particular interés en este contexto, al permitir integrar objetivos de producción, conservación y restauración dentro de una misma matriz territorial.

Frente al cambio climático, la restauración de la conectividad a lo largo de gradientes ambientales puede contribuir a mantener opciones de desplazamiento y persistencia para diferentes componentes de la biodiversidad. Sin embargo, la definición de corredores para *J. neotropica* debe sustentarse en información espacial sobre poblaciones, hábitat, fragmentación y condiciones climáticas actuales y futuras, evitando asumir que cualquier continuidad de cobertura arbórea constituye necesariamente conectividad funcional.

En este sentido, *J. neotropica* presenta características de interés para la restauración de paisajes forestales por su condición de especie nativa, su presencia bajo diferentes contextos ambientales y su posibilidad de integración en sistemas forestales y agroforestales. Su utilización debe responder, no obstante, a las condiciones ecológicas de cada sitio y a objetivos claramente definidos de conservación, restauración o producción.

5.7.3. Manejo de microcuencas y restauración ecológica

La incorporación de *J. neotropica* en procesos de restauración de microcuencas puede formar parte de estrategias orientadas a recuperar cobertura arbórea, estabilizar áreas degradadas y favorecer la recuperación de funciones ecológicas del paisaje. En estos contextos, los beneficios esperados dependen no solamente de la especie utilizada, sino también de la composición y estructura de la vegetación restaurada, las características del suelo, la topografía, el régimen hídrico y las prácticas de manejo implementadas.

La experiencia desarrollada en la microcuenca **Tundo–Papayal** constituye un ejemplo de la incorporación de especies nativas dentro de un proceso que articuló producción de plantas, reforestación, participación comunitaria y manejo sostenible de los recursos forestales. Este caso evidencia la importancia de abordar la restauración desde una perspectiva integral, en la que los componentes ecológicos se relacionen con las necesidades y actividades de las comunidades locales.

Para *J. neotropica*, este enfoque resulta particularmente pertinente debido a que la especie puede formar parte tanto de acciones de recuperación de cobertura forestal como de sistemas productivos diversificados. Su incorporación en microcuencas y paisajes degradados debe considerar la procedencia del material vegetal, las condiciones climáticas y edáficas del sitio, la disponibilidad hídrica, las características del sistema de restauración y los objetivos de manejo.

Estas orientaciones son consistentes con los enfoques de restauración del paisaje promovidos en Ecuador, que reconocen la importancia de las especies nativas, la recuperación de funciones ecosistémicas, la conectividad y la participación de los actores locales. Dentro de este marco, *J. neotropica* constituye una especie de interés para la restauración de paisajes andinos, siempre que su utilización responda a criterios ecológicos, genéticos y silviculturales apropiados.

5.8. Función ecológica de *J. neotropica* en los paisajes andinos

La información presentada en este capítulo evidencia que la importancia ecológica de *J. neotropica* trasciende su condición de especie forestal nativa. Su distribución a lo largo de los Andes ecuatorianos, su presencia bajo condiciones ambientales contrastantes y su integración tanto en bosques y remanentes naturales como en sistemas agroforestales, plantaciones y otros ambientes manejados permiten reconocer su participación en diferentes componentes de la estructura de los paisajes andinos.

Como especie arbórea de larga vida, *J. neotropica* contribuye al mantenimiento de la cobertura y de la estructura vertical de la vegetación en los sitios donde persiste o es incorporada. Su presencia puede participar, conjuntamente con otras especies arbóreas, en procesos relacionados con la protección del suelo, regulación microclimática, incorporación de materia orgánica y mantenimiento de hábitats para otros organismos. Estas funciones dependen de la estructura y composición de cada ecosistema o sistema de manejo y, por tanto, no deben atribuirse exclusivamente al nogal ni interpretarse como efectos equivalentes en todos los ambientes donde se encuentra.

La presencia de *J. neotropica* en paisajes transformados adquiere particular relevancia desde la perspectiva de la conectividad. Los árboles dispersos, linderos, sistemas agroforestales, áreas con regeneración natural y pequeños remanentes forestales pueden incrementar la continuidad de la cobertura arbórea dentro de matrices productivas y contribuir a conformar elementos de **conectividad estructural** entre fragmentos de vegetación. El grado en que estas estructuras facilitan efectivamente el movimiento de organismos, el flujo génico o procesos ecológicos específicos requiere, sin embargo, evaluaciones funcionales a escala de paisaje.

Los análisis desarrollados en este capítulo muestran que la presencia de *J. neotropica* se encuentra asociada con la interacción entre altitud, temperatura, precipitación, condiciones edáficas y características del paisaje. Los registros actualizados comprenden un gradiente altitudinal aproximado entre **905 y 3 091 m s. n. m.**, acompañado de una considerable variación térmica y pluviométrica. Esta amplitud ambiental documentada proporciona una referencia para comprender la diversidad de condiciones bajo las cuales se encuentra actualmente la especie y para orientar la conservación de poblaciones representativas de diferentes ambientes.

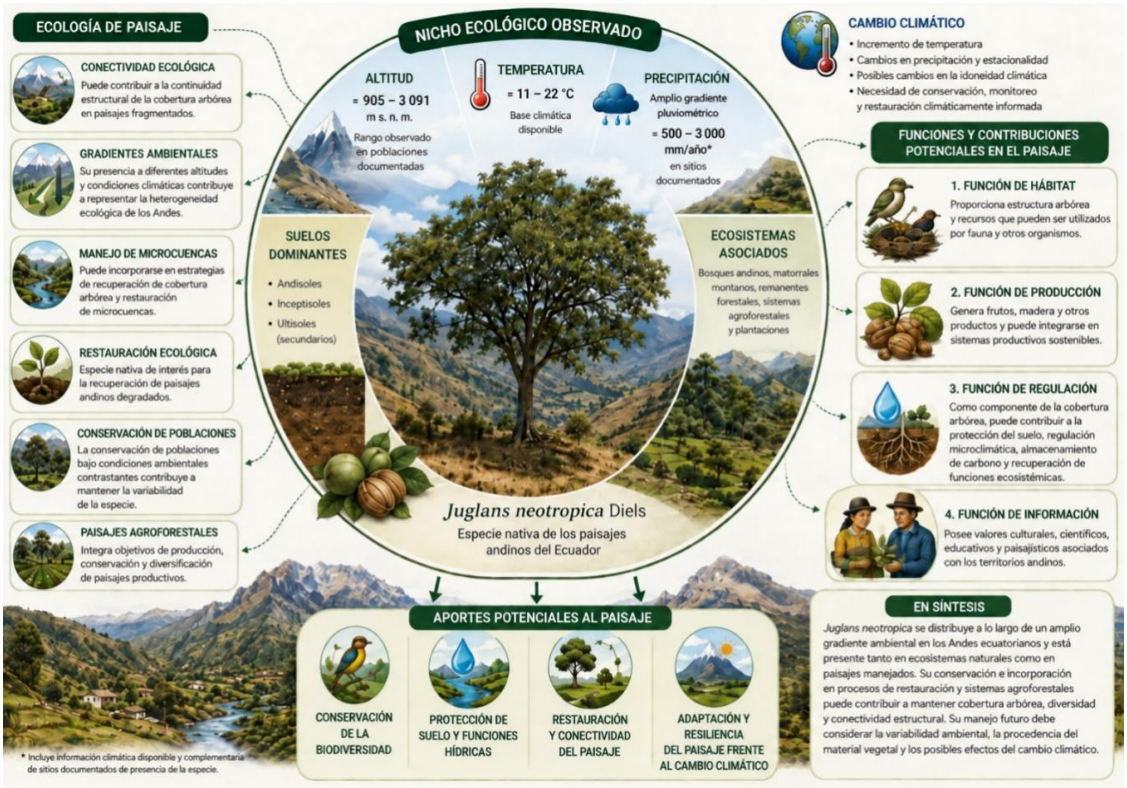
Desde una perspectiva de restauración, *J. neotropica* presenta características que permiten incorporarla en estrategias dirigidas a recuperar cobertura arbórea y diversidad de especies nativas y a complementar la conectividad de paisajes fragmentados. Su presencia en sistemas agroforestales y otros ambientes manejados amplía además las posibilidades de integrar objetivos ecológicos y productivos. No obstante, su utilización debe responder a las condiciones ambientales del sitio, la procedencia del material

vegetal, los objetivos específicos de restauración y la composición de las comunidades vegetales con las que se establece.

En conjunto, *J. neotropica* puede considerarse un **componente ecológicamente relevante de los paisajes andinos ecuatorianos**, cuya importancia se expresa tanto en poblaciones y remanentes naturales como en paisajes intervenidos. Su distribución geográfica y ambiental, sus diferentes formas de presencia en el territorio y su potencial de incorporación en procesos de restauración y manejo permiten articular dimensiones de conservación, conectividad y uso sostenible. La Figura 5.9 sintetiza los principales gradientes ambientales, contextos ecológicos y funciones potenciales asociados con la especie, proporcionando una visión integrada de su relación con los paisajes andinos.

Figura 5.9

Síntesis conceptual del nicho ecológico y de la función ecológica de Juglans neotropica en los paisajes andinos del Ecuador



Nota. Síntesis conceptual de la amplitud ambiental y las contribuciones potenciales de *J. neotropica* en los paisajes andinos del Ecuador. Los rangos corresponden a registros documentados de presencia y no representan límites fisiológicos ni condiciones óptimas de la especie. La síntesis se basa en los resultados del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

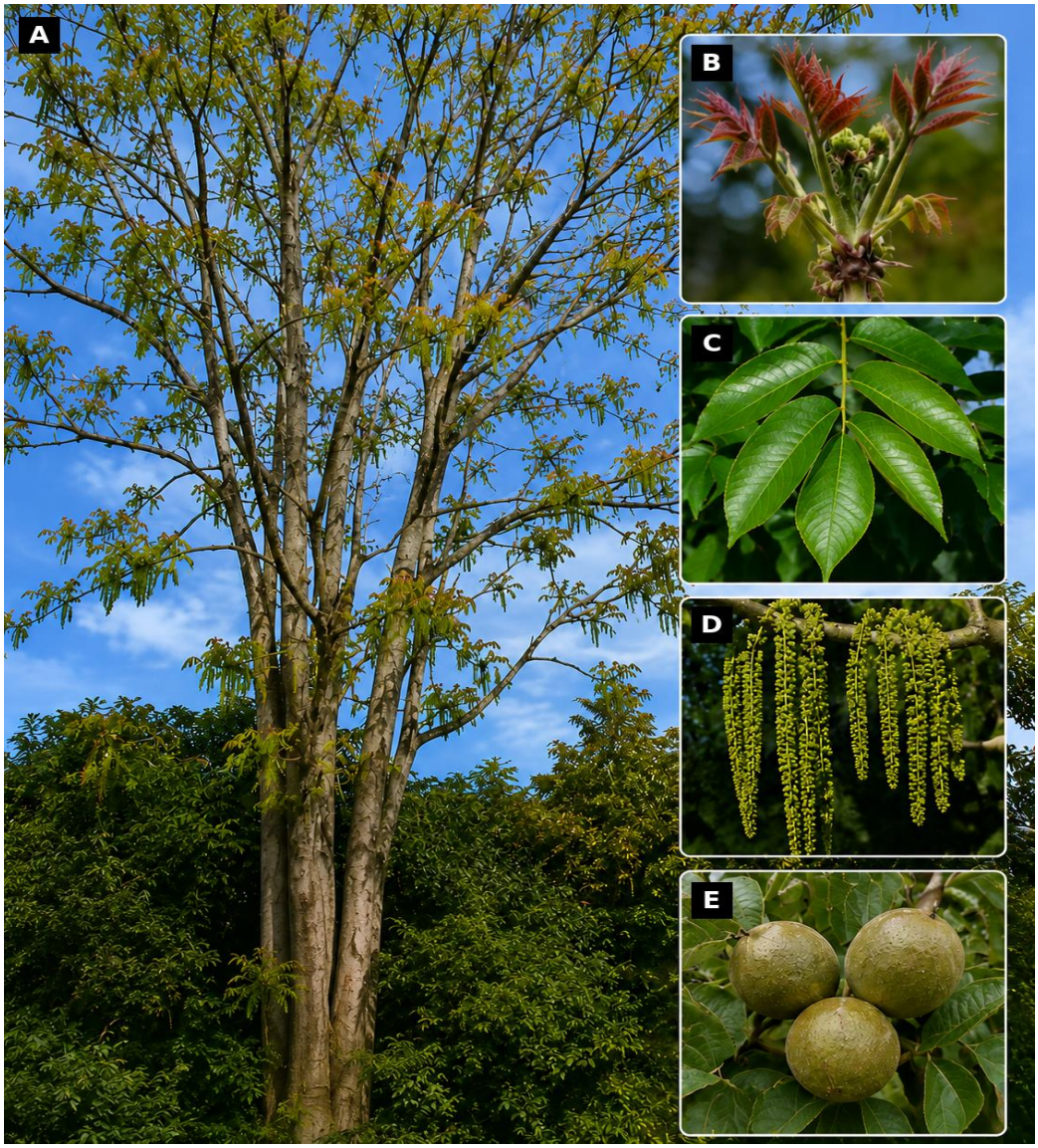
CAPÍTULO 6

Fenología de *Juglans neotropica*

Capítulo

6

Fenología de *Juglans neotropica*



A) Árbol de *J. neotropica* objeto del seguimiento fenológico. **B)** Brotes y hojas jóvenes. **C)** Hojas desarrolladas. **D)** Inflorescencias masculinas. **E)** Frutos en desarrollo. Cananvalle, Ibarra, Imbabura, Ecuador. Fotografías: Mario Añazco.

6.1. Fenología de *J. neotropica* en Ecuador

La fenología es la disciplina que estudia la ocurrencia, duración y sincronización temporal de los eventos periódicos del ciclo de vida de los organismos, así como las relaciones existentes entre estos procesos biológicos y las variaciones ambientales, particularmente las condiciones climáticas. En las especies arbóreas, las principales fenofases comprenden la brotación foliar, el desarrollo y la senescencia de las hojas, la floración, la fructificación y la dispersión de semillas. Debido a su estrecha dependencia de factores como la temperatura, la precipitación, el fotoperiodo y la disponibilidad hídrica, la fenología constituye uno de los indicadores biológicos más sensibles para evaluar la respuesta de la vegetación frente a la variabilidad climática y al cambio climático global (Primack & Miller-Rushing, 2012; Schwartz, 2024).

En las últimas décadas, la fenología se ha consolidado como una disciplina integradora entre la ecología, la climatología, la fisiología vegetal y las ciencias forestales, permitiendo comprender cómo los cambios ambientales modifican la dinámica funcional de los ecosistemas. Alteraciones relativamente pequeñas en la temperatura o en el régimen de precipitaciones pueden adelantar o retrasar la brotación, modificar la duración del periodo vegetativo, alterar la sincronización entre la floración y los agentes polinizadores o afectar el éxito reproductivo mediante cambios en la formación y maduración de los frutos. A escala macro-ecológica, este fenómeno es respaldado por el análisis global de Peñuelas et al. (2024), quienes demostraron una creciente asincronía y divergencia fenológica entre reinos debido al calentamiento global. Su estudio evidencia que las plantas adelantan sus fases estacionales a un ritmo significativamente mayor que los animales debido a un efecto de dependencia temporal acumulativa, lo que incrementa el riesgo de desajustes tróficos en los ecosistemas. Estas modificaciones fenológicas representan algunas de las evidencias biológicas más consistentes del calentamiento global y constituyen actualmente uno de los principales indicadores utilizados para monitorear los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres (Lang et al., 2025; Loughnan et al., 2024).

En especies arbóreas caducifolias, como las pertenecientes a la familia Juglandaceae, la secuencia anual de brotación, expansión foliar, senescencia y defoliación responde a una estrategia ecofisiológica que optimiza simultáneamente la captura de carbono, la conservación del agua y la eficiencia en el uso de nutrientes. Durante el periodo de crecimiento, el desarrollo del follaje incrementa la capacidad fotosintética y la producción de fotoasimilados, mientras que la senescencia permite la retranslocación de nitrógeno, fósforo y otros elementos minerales hacia tejidos permanentes antes de la caída de las hojas. Posteriormente, la hojarasca constituye una fuente esencial de materia orgánica y nutrientes que mantiene la fertilidad del suelo, favorece la actividad microbiana y contribuye al funcionamiento biogeoquímico de los ecosistemas forestales. En consecuencia, la fenología no solo regula el crecimiento y la reproducción de las plantas, sino que también participa activamente en el reciclaje de nutrientes y en la productividad de los bosques.

Los bosques montanos andinos presentan una elevada heterogeneidad ambiental originada por gradientes altitudinales, variaciones topográficas y diferencias locales en temperatura, humedad y radiación solar. En estos ecosistemas, la sincronización de las fenofases puede variar significativamente entre poblaciones cercanas, reflejando la

capacidad de las especies para ajustar su ciclo anual a condiciones ambientales particulares. Esta variabilidad estructural y ecológica ha sido cuantificada en el sur del Ecuador por Palacios-Herrera et al. (2023), quienes evidenciaron la amplia plasticidad de *J. neotropica* al registrar poblaciones naturales y plantadas distribuidas en un gradiente altitudinal que abarca desde los 1 400 hasta los 2 800 m s. n. m. Asimismo, los autores identificaron ecosistemas clave como la Reserva Natural El Tundo, donde la presencia de hasta 12 clases diamétricas bien distribuidas demuestra una dinámica activa de regeneración natural y estabilidad ecológica, confirmando que la heterogeneidad del paisaje regula directamente el vigor y la persistencia del taxón. Esta capacidad, conocida como plasticidad fenológica, constituye un mecanismo adaptativo que incrementa la resiliencia frente a la variabilidad climática y permite mantener el éxito reproductivo en ambientes caracterizados por una elevada complejidad ecológica (Morellato et al., 2025; Schwartz, 2024).

Dentro de la familia Juglandaceae, las especies del género *Juglans* presentan un patrón fenológico relativamente conservado, caracterizado por la renovación anual del follaje, la floración unisexual y una marcada protandria, fenómeno mediante el cual la liberación del polen por los amentos masculinos ocurre antes de que las flores femeninas alcancen su receptividad. Esta separación temporal favorece la polinización cruzada, incrementa la diversidad genética y reduce la probabilidad de autofecundación, constituyendo una estrategia reproductiva ampliamente documentada en especies como *Juglans regia* L. y *Juglans nigra* L. (Ramírez & Kallarackal, 2015).

El estudio de la fenología ha sido además estandarizado mediante la escala **Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie (BBCH)**, considerada actualmente uno de los sistemas internacionales más utilizados para describir y comparar los estados de desarrollo de especies agrícolas y forestales. La aplicación de esta escala permite registrar objetivamente las diferentes fenofases y facilita la comparación entre regiones, especies y años de observación, además de proporcionar una herramienta útil para programas de monitoreo ecológico, manejo forestal y evaluación de los efectos del cambio climático (Meier, 2013).

En *J. neotropica*, el conocimiento fenológico continúa siendo limitado en comparación con otras especies del género. La mayor parte de las investigaciones disponibles se han concentrado en aspectos taxonómicos, ecológicos, genéticos o silviculturales, mientras que los estudios específicos sobre la dinámica temporal de las fenofases son escasos y generalmente se restringen a poblaciones locales. Entre los trabajos más relevantes se encuentra el seguimiento fenológico realizado en el arbolado urbano de Bogotá, Colombia, donde se confirmó el carácter caducifolio y protándrico de la especie mediante la aplicación de la escala BBCH, demostrando además la coexistencia temporal entre la caída de hojas y la emisión de nuevos brotes (Ramírez & Kallarackal, 2021). Esta aproximación regional se complementa con los registros de Díaz Ramírez (2019) en el valle de Cajamarca, Perú, quien documentó la sincronización de las fases de defoliación, brotación y maduración de frutos en valles interandinos, aportando datos clave sobre el comportamiento biológico de la especie en el extremo sur de su distribución natural.

A escala nacional, investigaciones recientes desarrolladas en el sur del Ecuador evidencian que las poblaciones naturales y plantaciones presentan variaciones de hasta

un mes en la ocurrencia de las principales fenofases, diferencias asociadas a gradientes climáticos, edáficos y topográficos que reflejan una elevada plasticidad fenológica y una notable capacidad de adaptación frente a condiciones ambientales contrastantes (Palacios et al., 2025a).

Desde una perspectiva aplicada, el conocimiento del calendario fenológico constituye un componente esencial para el manejo sostenible de *J. neotropica*. La determinación precisa de las épocas de brotación, floración, fructificación y maduración permite planificar la recolección de semillas, seleccionar árboles semilleros, programar labores de viverización, establecer calendarios de poda y tratamientos silviculturales, optimizar el monitoreo fitosanitario y apoyar programas de restauración ecológica, conservación genética y mejoramiento forestal. Asimismo, el seguimiento fenológico proporciona una herramienta sensible para evaluar la respuesta de la especie frente al cambio climático y orientar estrategias de adaptación en los bosques andinos.

Finalmente, este capítulo integra la información fenológica obtenida durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), desarrollado por la Universidad Técnica del Norte en diferentes sistemas de manejo de la provincia de Imbabura, con investigaciones realizadas en poblaciones naturales y plantaciones del sur del Ecuador. El análisis conjunto permite caracterizar la dinámica anual de las principales fenofases de *J. neotropica*, evaluar su relación con las variables climáticas y discutir las implicaciones ecológicas, silviculturales y de conservación derivadas de la variabilidad fenológica observada.

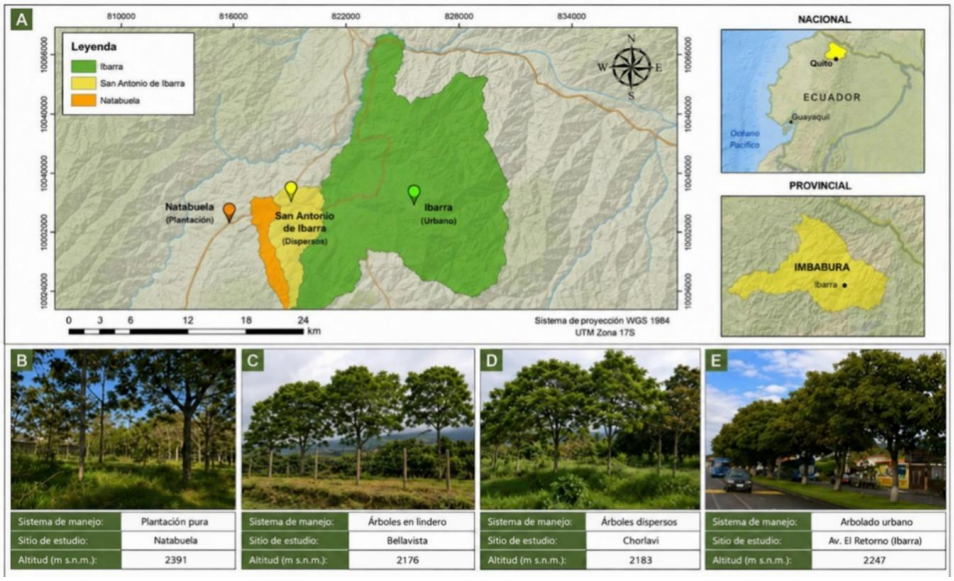
6.2. Dinámica fenológica en la provincia de Imbabura

La provincia de Imbabura constituye una de las regiones con mayor presencia de *J. neotropica* en el norte del Ecuador y presenta una amplia diversidad de condiciones ecológicas y sistemas de manejo donde la especie forma parte tanto de ecosistemas naturales como de paisajes transformados por la actividad humana. Esta heterogeneidad convierte a la provincia en un escenario adecuado para evaluar la respuesta fenológica del nogal andino frente a diferentes condiciones microambientales y de manejo.

Con el propósito de caracterizar el ciclo anual de la especie, durante dos años consecutivos se realizó el seguimiento fenológico de poblaciones de *J. neotropica* establecidas en cuatro sistemas representativos del paisaje andino: **plantación pura (bosquete), árboles en lindero, árboles dispersos en matrices agropecuarias y arbolado urbano** (Figura 6.1). Estos sistemas representan un gradiente creciente de intervención antrópica y de exposición ambiental, permitiendo analizar cómo las condiciones del entorno modifican la sincronización y la intensidad de las principales fenofases.

Figura 6.1

Localización de los cuatro sistemas de manejo evaluados para el estudio fenológico de Juglans neotropica en la provincia de Imbabura



Nota. **A)** Ubicación geográfica de los cuatro sitios de estudio en la provincia de Imbabura. **B)** Plantación pura en Natabuela. **C)** Árboles en lindero en Bellavista. **D)** Árboles dispersos en Chorlavi. **E)** Arbolado urbano en la Av. El Retorno, Ibarra.

La información utilizada en este capítulo proviene principalmente de las investigaciones desarrolladas por Díaz & Vilema (2023), Vallejos et al. (2023) y Ochoa & Quinche (2024), ejecutadas en el marco del **Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026)** de la Universidad Técnica del Norte. Los estudios fueron complementados con observaciones de campo realizadas por el autor en las mismas localidades, lo que permitió validar la consistencia temporal de los patrones registrados y fortalecer la interpretación ecológica de los resultados.

El monitoreo comprendió las principales fenofases vegetativas y reproductivas de la especie: emisión de hojas jóvenes, desarrollo de hojas adultas, defoliación, floración masculina y femenina, formación de frutos fecundados, desarrollo de frutos jóvenes y maduración de frutos. Para cada fenofase se registró el periodo de máxima ocurrencia y su intensidad mediante un índice de masividad de cuatro categorías (0–3), donde **0 = ausencia**, **1 = baja**, **2 = media** y **3 = alta intensidad**. Paralelamente, se registraron variables climáticas mensuales, incluyendo precipitación, temperatura y luminosidad, con el fin de analizar su relación con la dinámica fenológica observada.

A diferencia de presentar los resultados de manera independiente para cada sistema de manejo, como es habitual en informes técnicos o tesis individuales, en esta monografía se adopta un enfoque comparativo e integrador. Los datos fueron reorganizados en una matriz fenológica anual que permite visualizar simultáneamente la secuencia temporal de las fenofases y las diferencias entre sistemas, facilitando la identificación de patrones comunes y respuestas particulares asociadas a las condiciones ambientales de cada sitio.

Este enfoque permite interpretar la fenología de *J. neotropica* desde una perspectiva ecofisiológica y paisajística, destacando el papel de factores como la disponibilidad hídrica, la temperatura, la radiación solar, la estructura del dosel y el grado de intervención humana en la regulación del ciclo anual de la especie. Asimismo, proporciona una base científica para la planificación de actividades de manejo forestal, recolección de semillas, restauración ecológica y conservación genética del nogal andino en diferentes contextos ambientales.

6.2.1. Calendario fenológico comparativo

El seguimiento fenológico realizado entre 2022 y 2024 permitió caracterizar la secuencia anual de las principales fenofases vegetativas y reproductivas de *J. neotropica* en cuatro sistemas de manejo representativos de la provincia de Imbabura: plantación pura, árboles en lindero, árboles dispersos y arbolado urbano. Aunque la especie mantiene un patrón fenológico general común, la sincronización temporal y la intensidad de cada fenofase mostraron variaciones asociadas a las condiciones microclimáticas y al grado de intervención de cada sistema.

Con el fin de sintetizar la información obtenida y facilitar la comparación entre sistemas de manejo, los resultados se presentan mediante un calendario fenológico anual (Tabla 6.1), acompañado por una caracterización general de las condiciones ambientales de los sitios de estudio (Tabla 6.2) y una representación gráfica integrada del calendario fenológico y de la intensidad relativa de las fenofases (Figura 6.2). Esta organización permite visualizar simultáneamente la ocurrencia temporal de los eventos biológicos y constituye la base para la interpretación ecofisiológica desarrollada en las secciones siguientes.

Tabla 6.1

Calendario fenológico comparativo de Juglans neotropica en cuatro sistemas de manejo de la provincia de Imbabura

Fenofase	Plantación pura	Árboles en lindero	Árboles dispersos	Arbolado urbano
Hoja joven	Finales de marzo	Finales de abril	Junio	Mediados de febrero
Hoja adulta	Finales de febrero	Diciembre	Finales de febrero	Finales de abril
Defoliación	Inicios de marzo	Finales de febrero	Finales de abril	Finales de abril
Flor joven	Finales de abril	Finales de febrero	Finales de abril	Finales de marzo
Flor adulta	Mayo	Finales de abril	Finales de abril	Julio
Fruto fecundado	Agosto	Junio	Agosto	Noviembre
Fruto joven	Diciembre	Agosto	Octubre	Diciembre
Fruto maduro	Diciembre	Noviembre	Diciembre	Diciembre

Nota. El calendario corresponde al periodo de máxima expresión de cada fenofase observado durante el seguimiento fenológico realizado entre 2022 y 2024. La información se sintetizó a partir de Díaz & Vilema (2023), Vallejos et al. (2023), Ochoa & Quinche (2024) y observaciones realizadas en el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), Universidad Técnica del Norte.

El calendario fenológico comparativo evidencia que *J. neotropica* mantiene una secuencia anual relativamente constante de desarrollo; sin embargo, las diferencias temporales observadas entre sistemas sugieren la influencia de factores ambientales locales. La interpretación de estos patrones requiere considerar el contexto ecológico en el que se desarrolló cada población, particularmente las variaciones de altitud, temperatura, precipitación y grado de intervención antrópica. Estas condiciones se sintetizan en la Tabla 6.2 y constituyen la base para el análisis ecofisiológico presentado en la siguiente sección.

Tabla 6.2

Características ambientales de los sistemas de manejo evaluados en la provincia de Imbabura

Sistema de manejo	Localidad	Altitud (m s.n.m.)	Temperatura media (°C)	Precipitación anual (mm)	Características ambientales
Plantación pura	Natabuela	2 391	16,0	635	Dosel relativamente continuo; baja perturbación; microclima estable.
Árboles en lindero	Bellavista	2 176	17,0	750	Alta exposición lateral; efecto de borde; influencia agrícola.
Árboles dispersos	Chorlaví	2 183	17,0	750	Árboles aislados con elevada radiación y escasa competencia.
Arbolado urbano	Av. El Retorno (Ibarra)	2 247	18,5	749	Influencia de la isla de calor urbana y elevada intervención antrópica.

Nota. Las condiciones climáticas corresponden a los valores medios registrados durante el periodo de evaluación y representan el contexto ambiental donde se desarrolló el seguimiento fenológico.

La comparación de las condiciones ambientales resumidas en la Tabla 6.2 pone de manifiesto que los cuatro sistemas de manejo representan escenarios ecológicos contrastantes para el desarrollo de *J. neotropica*. Aunque las diferencias altitudinales entre los sitios son relativamente reducidas (2 176–2 391 m s.n.m.), las variaciones en temperatura, precipitación, estructura del dosel y grado de intervención antrópica generan microambientes con características particulares que pueden influir sobre la sincronización, duración e intensidad de las diferentes fenofases.

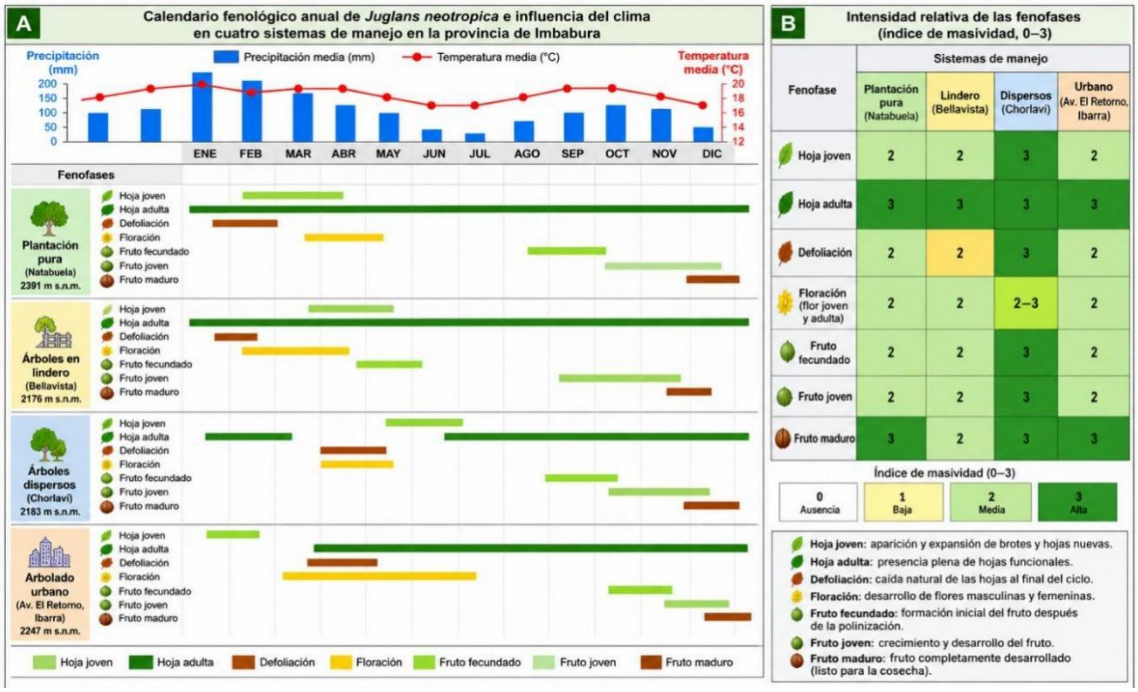
En términos generales, las plantaciones puras presentan un microclima más estable debido a la continuidad del dosel, mientras que los árboles establecidos en linderos y sistemas dispersos experimentan una mayor exposición a la radiación solar, al viento y a las fluctuaciones térmicas. Por su parte, el arbolado urbano se desarrolla bajo condiciones propias de la ciudad, donde el efecto de isla de calor, la compactación del suelo y las actividades humanas modifican parcialmente el ambiente en comparación con los sistemas rurales.

Con el propósito de integrar la información temporal de las fenofases y facilitar la comparación entre sistemas de manejo, la Figura 6.2 presenta una síntesis gráfica del calendario fenológico anual y de la intensidad relativa de las principales fenofases registradas durante el seguimiento realizado entre 2022 y 2024. Esta representación permite visualizar simultáneamente la secuencia cronológica del ciclo biológico de la

especie y constituye la base para la interpretación ecofisiológica desarrollada en la siguiente sección.

Figura 6.2

Calendario fenológico anual e intensidad relativa de las principales fenofases de Juglans neotropica en cuatro sistemas de manejo de la provincia de Imbabura



Nota. **A)** Calendario fenológico anual de las principales fenofases en los cuatro sistemas de manejo evaluados, en relación con la precipitación media mensual (barras azules) y la temperatura media mensual (línea roja) registrada en los sitios de estudio entre 2022 y 2024. **B)** Intensidad relativa de las fenofases expresada mediante el índice de masividad (0 = ausencia, 1 = baja, 2 = media, 3 = alta). Fuente: Programa de Investigación Juglans (2021-2026), Universidad Técnica del Norte.

La comparación integrada de las tablas y de la Figura 6.2 evidencia que *J. neotropica* conserva una secuencia fenológica anual relativamente constante en los cuatro sistemas de manejo; sin embargo, la fecha de inicio, duración e intensidad de varias fenofases presentan diferencias temporales que reflejan la influencia de las condiciones microclimáticas locales. Estas variaciones son particularmente evidentes en la brotación foliar, la defoliación y el inicio de la floración, mientras que las fases finales del desarrollo reproductivo muestran una mayor sincronía entre sistemas.

La síntesis comparativa presentada constituye la base para interpretar los mecanismos ecofisiológicos que regulan la dinámica anual de la especie y para comprender cómo factores como la temperatura, la disponibilidad hídrica, la radiación solar y el grado de intervención del paisaje modifican la expresión de las principales fenofases. Estos aspectos se analizan en detalle en la siguiente sección.

6.2.2. Interpretación ecofisiológica del calendario fenológico

El calendario fenológico comparativo evidencia que *J. neotropica* mantiene un ciclo anual relativamente conservado en los diferentes sistemas de manejo evaluados, aunque la sincronización temporal y la intensidad de las fenofases presentan variaciones atribuibles a las condiciones ambientales locales. Este comportamiento refleja una elevada plasticidad fenológica, entendida como la capacidad de una especie para modificar el momento de ocurrencia de sus eventos biológicos en respuesta a cambios en las condiciones climáticas y microambientales, sin alterar la secuencia general de su ciclo de desarrollo (Morellato et al., 2025; Schwartz, 2024).

Brotación foliar y desarrollo del follaje

La brotación constituye una de las fenofases más sensibles a las condiciones ambientales debido a que marca el reinicio de la actividad fisiológica después del periodo de reposo relativo. En *J. neotropica*, la emisión de hojas jóvenes mostró diferencias temporales entre los sistemas de manejo, observándose un inicio más temprano en el arbolado urbano y un retraso relativo en árboles dispersos y plantaciones. Este comportamiento puede atribuirse principalmente a diferencias en temperatura, disponibilidad hídrica y radiación solar, variables que regulan la reactivación del cambium vascular, la expansión foliar y el crecimiento de nuevos brotes (Lang et al., 2025; Richardson et al., 2013).

En ambientes urbanos, el efecto de isla de calor incrementa ligeramente la temperatura media y reduce la amplitud térmica diaria, favoreciendo el adelanto de la brotación. Por el contrario, en sistemas rurales abiertos, la mayor exposición al viento, las fluctuaciones térmicas y la menor disponibilidad inmediata de agua pueden retrasar el desarrollo inicial del follaje. Sin embargo, una vez establecida la copa, las diferencias entre sistemas tienden a disminuir, indicando que la especie mantiene una elevada capacidad de ajuste frente a condiciones ambientales contrastantes.

Defoliación y reciclaje de nutrientes

La defoliación constituye una estrategia ecofisiológica característica de las especies caducifolias y representa un mecanismo eficiente para reducir las pérdidas de agua durante los periodos menos favorables. Antes de la abscisión foliar, una proporción importante del nitrógeno, fósforo y otros nutrientes presentes en las hojas es retranslocada hacia ramas, tallos y raíces, donde permanece almacenada hasta el inicio del siguiente ciclo vegetativo (Aerts, 1996; Killingbeck, 1996).

Posteriormente, la hojarasca incorporada al suelo contribuye significativamente al reciclaje de nutrientes y al mantenimiento de la fertilidad edáfica mediante los procesos de descomposición y mineralización. En ecosistemas andinos, este proceso adquiere una importancia adicional debido a la elevada dependencia que presentan muchas especies arbóreas respecto del reciclaje interno de nutrientes para sostener la productividad del bosque (Lang et al., 2025).

La relativa sincronía observada en la defoliación entre los diferentes sistemas sugiere que este proceso está regulado principalmente por señales fisiológicas internas

asociadas al estado hídrico y al balance hormonal de la planta, más que por diferencias microclimáticas locales.

Floración y estrategia reproductiva

La floración de *J. neotropica* presentó un patrón relativamente constante entre los sistemas de manejo, caracterizado por la aparición sucesiva de estructuras reproductivas masculinas y femeninas. Este comportamiento corresponde al fenómeno conocido como **protandria**, ampliamente documentado en especies del género *Juglans*, donde la liberación del polen ocurre antes de que las flores femeninas alcancen su máxima receptividad (Ramírez & Kallarackal, 2015).

Desde una perspectiva evolutiva, la protandria constituye un mecanismo que reduce la autofecundación y favorece la polinización cruzada, incrementando la recombinación genética y la diversidad de las poblaciones naturales. Esta estrategia resulta particularmente importante en especies anemófilas como *Juglans*, cuya dispersión del polen depende de la circulación del viento y de una adecuada sincronización entre individuos reproductivos.

La menor variabilidad temporal observada durante la floración, en comparación con la brotación foliar, sugiere que la inducción reproductiva responde a mecanismos fisiológicos más conservados y menos influenciados por las variaciones microclimáticas de corto plazo.

El patrón reproductivo observado en *J. neotropica* es consistente con el registrado en otras especies del género *Juglans*, particularmente *J. regia* y *J. nigra*, donde la protandria constituye una estrategia ampliamente documentada para favorecer la polinización cruzada y reducir la autofecundación (Germain, 1997; Pollegioni et al., 2017). En estas especies, la antesis de los amentos masculinos generalmente precede a la receptividad de las flores femeninas, incrementando la recombinación genética y la variabilidad poblacional. Aunque en *J. neotropica* la información disponible aún es limitada, la sincronización reproductiva registrada en este estudio sugiere que comparte mecanismos evolutivos similares dentro de la familia Juglandaceae, caracterizados por una elevada eficiencia de la polinización anemófila y una estrecha regulación fenológica del ciclo reproductivo.

Desarrollo y maduración de los frutos

Las fenofases relacionadas con el desarrollo del fruto mostraron una mayor sincronización entre sistemas de manejo que las fases vegetativas. Esta convergencia probablemente representa una ventaja adaptativa, ya que permite que la maduración y dispersión de las semillas coincidan con el inicio de condiciones ambientales favorables para la germinación y el establecimiento de las plántulas.

En especies forestales de ambientes estacionales, la sincronización reproductiva incrementa además la eficiencia de dispersión y reduce el riesgo de pérdidas ocasionadas por condiciones climáticas adversas o por depredación de semillas. En *J. neotropica*, esta estrategia podría explicar la relativa estabilidad temporal observada durante la fase final

del ciclo reproductivo, independientemente del sistema de manejo donde se desarrollan los árboles.

La sincronización observada durante la fructificación coincide con lo reportado para otras especies de *Juglans*, donde el desarrollo de los frutos muestra una variabilidad considerablemente menor que las fenofases vegetativas, un comportamiento evolutivo y taxonómico característico documentado en el género (McGranahan & Leslie, 1991; Pollegioni et al., 2017), el cual responde a un estricto control fisiológico del desarrollo embrionario y de la acumulación de reservas, procesos que deben completarse antes del inicio de condiciones ambientales desfavorables (McGranahan & Leslie, 1991; Pollegioni et al., 2017). Esta relativa estabilidad reproductiva también ha sido descrita en especies arbóreas de bosques montanos andinos, donde la maduración de los frutos suele concentrarse en los periodos de mayor probabilidad de establecimiento de las plántulas.

Plasticidad fenológica y adaptación al paisaje andino

En conjunto, los resultados evidencian que *J. neotropica* posee una elevada plasticidad fenológica, expresada principalmente mediante desplazamientos temporales en el inicio de algunas fenofases vegetativas sin alterar la secuencia general del ciclo anual. Esta capacidad de ajuste constituye un mecanismo adaptativo que permite a la especie responder a diferencias locales de temperatura, disponibilidad hídrica, radiación solar y estructura del paisaje.

La plasticidad fenológica observada en *J. neotropica* también coincide con patrones descritos para otras especies arbóreas de bosques montanos andinos. Investigaciones realizadas en Colombia han demostrado que numerosas especies caducifolias presentan desplazamientos temporales en la brotación, floración y fructificación asociados principalmente a la disponibilidad hídrica y a la variabilidad interanual de las precipitaciones, más que a cambios extremos de temperatura (Cavelier et al., 1998; Rojas-Robles & Stiles, 2009). De manera similar, estudios efectuados en bosques montanos del norte del Perú indican que la fenología reproductiva responde a gradientes altitudinales y microclimáticos, permitiendo mantener la producción de flores y frutos bajo condiciones ambientales altamente heterogéneas (Kessler, 2002; Homeier et al., 2010).

En comparación con estas investigaciones, los resultados obtenidos para *J. neotropica* evidencian una elevada sincronía en la secuencia general de las fenofases, acompañada de variaciones relativamente pequeñas en el momento de inicio y duración entre los diferentes sistemas de manejo. Este comportamiento sugiere que la especie mantiene una estrategia fenológica conservadora, capaz de ajustarse a cambios locales del ambiente sin modificar la organización temporal de su ciclo anual. Dicha característica probablemente representa una ventaja adaptativa para persistir en paisajes andinos sujetos a una marcada heterogeneidad ambiental y a procesos continuos de transformación del uso del suelo.

La plasticidad fenológica adquiere especial relevancia en los Andes ecuatorianos, donde los gradientes altitudinales y la elevada heterogeneidad ambiental generan una amplia diversidad de microclimas incluso a escalas espaciales reducidas. En este contexto, la flexibilidad observada en *J. neotropica* probablemente representa una de las

principales estrategias que han permitido su persistencia en bosques montanos, sistemas agroforestales, plantaciones y ambientes urbanos, favoreciendo tanto su éxito reproductivo como su capacidad de adaptación frente a escenarios de variabilidad climática y cambio climático.

Recuadro 6.1

Observación de campo del Programa de Investigación Juglans (2021–2026): Solapamiento fenológico en Juglans neotropica

Durante el seguimiento fenológico realizado en poblaciones de *Juglans neotropica* en la provincia de Imbabura se observó que algunos individuos presentaron simultáneamente brotes vegetativos, hojas jóvenes, hojas completamente desarrolladas, inflorescencias y frutos en diferentes estados de desarrollo, incluso dentro de una misma rama.

Esta coexistencia de fenofases, denominada **solapamiento fenológico**, no fue cuantificada durante el presente estudio; sin embargo, su ocurrencia repetida sugiere un elevado grado de plasticidad fenológica y una respuesta diferencial de los distintos módulos de la copa frente a variaciones locales de radiación, temperatura, disponibilidad hídrica y estado fisiológico.

Aunque algunos estudios han demostrado que la variabilidad climática puede modificar la sincronización fenológica de numerosas especies arbóreas, los resultados obtenidos en este estudio no permiten atribuir este comportamiento al cambio climático. La confirmación de esta hipótesis requerirá series de monitoreo de largo plazo y estudios específicos sobre la dinámica fenológica intraindividual.

Perspectiva de investigación. La frecuencia, magnitud y causas del solapamiento fenológico constituyen una línea de investigación prometedora para *J. neotropica*. Estudios futuros podrían evaluar su relación con la arquitectura modular del árbol, los gradientes microclimáticos dentro de la copa y la variabilidad climática interanual, aportando nuevos elementos para comprender la capacidad adaptativa de la especie en los Andes tropicales.

6.2.3. Implicaciones ecológicas y silviculturales de la variación fenológica entre sistemas de manejo

Las diferencias fenológicas observadas entre los cuatro sistemas de manejo evaluados demuestran que *J. neotropica* posee una notable capacidad de ajuste frente a condiciones ambientales contrastantes. Aunque la secuencia general de las fenofases se mantiene relativamente constante, las variaciones en su sincronización e intensidad tienen implicaciones directas para la conservación, el manejo silvicultural, la producción de plantas y el aprovechamiento sostenible de la especie. En este sentido, la información fenológica trasciende el ámbito descriptivo y constituye una herramienta fundamental para la planificación de actividades forestales, la conservación de la biodiversidad y la restauración ecológica (Primack & Miller-Rushing, 2012; Schwartz, 2024).

Conservación y monitoreo de poblaciones naturales

El conocimiento del calendario fenológico facilita la identificación de los periodos críticos del ciclo biológico de la especie, permitiendo orientar acciones de conservación hacia las fases de mayor sensibilidad ecológica, como la floración, la polinización y la maduración de frutos. La sincronización reproductiva influye directamente en la producción de semillas viables y, por tanto, en la regeneración natural y el mantenimiento de la diversidad genética de las poblaciones (Morellato et al., 2016).

Asimismo, el seguimiento continuo de la fenología constituye uno de los indicadores biológicos más utilizados para detectar respuestas de las especies frente a variaciones ambientales de largo plazo. Cambios persistentes en la fecha de brotación, floración o fructificación pueden reflejar modificaciones en el régimen climático o en las condiciones ecológicas locales, convirtiendo a la fenología en una herramienta complementaria para el monitoreo de los bosques andinos (Richardson et al., 2013; Schwartz, 2024).

Recolección de semillas y producción de plantas

La información fenológica permite programar con mayor precisión las actividades de recolección de semillas, evitando cosechas prematuras o tardías que disminuyen la calidad fisiológica del material reproductivo. En *J. neotropica*, la identificación del periodo de máxima maduración constituye un criterio fundamental para seleccionar árboles semilleros y optimizar la obtención de semillas destinadas a viveros, bancos de germoplasma y programas de restauración.

De igual manera, el conocimiento del ciclo reproductivo facilita la planificación de la producción de plantas, permitiendo sincronizar la disponibilidad de plántulas con la época más favorable para su establecimiento en campo. Esta integración entre fenología, calidad de semillas y propagación será desarrollada con mayor detalle en los capítulos 7 y 8 de la presente monografía.

Manejo silvicultural y establecimiento de plantaciones

La fenología constituye un criterio técnico para programar diversas prácticas silviculturales. Actividades como la poda de formación, los raleos, el control de malezas y la fertilización pueden ejecutarse con mayor eficiencia cuando se consideran las fases de crecimiento vegetativo y reproductivo de la especie. En particular, las intervenciones realizadas durante periodos de menor actividad fisiológica reducen el estrés de los árboles y favorecen una recuperación más rápida del crecimiento (Kozlowski & Pallardy, 2002).

En plantaciones destinadas a la producción de madera o al mejoramiento genético, la sincronización de la floración y la fructificación adquiere además una importancia estratégica, ya que influye en la planificación de cruzamientos controlados, la recolección de material genético y la evaluación del comportamiento reproductivo de diferentes procedencias.

Restauración ecológica y sistemas agroforestales

Las diferencias fenológicas registradas entre árboles establecidos en plantaciones, linderos, sistemas dispersos y ambientes urbanos evidencian la capacidad adaptativa de *J. neotropica* frente a diferentes condiciones del paisaje. Esta plasticidad incrementa su potencial para ser utilizada en programas de restauración ecológica y en sistemas agroforestales, donde la especie debe responder a condiciones de radiación, competencia y disponibilidad hídrica distintas a las de los bosques naturales (Lang et al., 2025).

La sincronización de la producción de frutos también resulta relevante para la fauna silvestre, ya que contribuye al suministro temporal de recursos alimenticios y favorece procesos de dispersión de semillas. En consecuencia, la conservación de árboles aislados, linderos y pequeños rodales puede desempeñar un papel importante en el mantenimiento de la conectividad ecológica y de los procesos funcionales del paisaje andino (Morellato et al., 2016).

Fenología como herramienta para la adaptación al cambio climático

Aunque los resultados obtenidos en este estudio no permiten establecer relaciones causales entre las variaciones fenológicas observadas y el cambio climático, el monitoreo sistemático de las fenofases representa una herramienta de gran valor para evaluar respuestas futuras de *J. neotropica* frente a escenarios de variabilidad ambiental. La continuidad de los registros iniciados por el Programa de Investigación *Juglans* permitirá disponer, en los próximos años, de una base de datos de largo plazo capaz de identificar tendencias temporales y posibles desplazamientos en el calendario fenológico asociados a modificaciones del clima regional (Richardson et al., 2013; Schwartz, 2024).

En este contexto, la fenología no solo constituye un componente fundamental de la biología de la especie, sino también un indicador para orientar estrategias de conservación adaptativa, manejo forestal y restauración de los bosques montanos andinos bajo escenarios de cambio global (Tabla 6.3).

Tabla 6.3

Implicaciones del conocimiento fenológico para el manejo y la conservación de Juglans neotropica

Aspecto fenológico	Aplicación principal
Floración	Conservación genética y seguimiento de la reproducción.
Fructificación	Planificación de recolección de frutos.
Maduración de frutos	Determinación de épocas de recolección de semillas.
Brotación foliar	Seguimiento del crecimiento y orientación del manejo silvicultural.
Defoliación	Monitoreo fenológico y Ambiental.
Variación temporal de las fenofases	Monitoreo de respuestas frente al cambio climático.

Nota. Síntesis elaborada a partir de los resultados fenológicos obtenidos en el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) y de sus aplicaciones potenciales para el manejo y la conservación de *J. neotropica*.

6.3. Síntesis e implicaciones para la investigación y el manejo

La fenología constituye uno de los componentes fundamentales para comprender la biología, ecología y capacidad adaptativa de *J. neotropica*. El seguimiento realizado en cuatro sistemas de manejo de la provincia de Imbabura permitió caracterizar por primera vez, de manera comparativa, la secuencia anual de las principales fenofases vegetativas y reproductivas de la especie bajo diferentes condiciones ambientales y de uso del suelo. Los resultados evidencian que, aunque el calendario fenológico mantiene una organización temporal relativamente constante, la sincronización e intensidad de algunas fenofases presentan variaciones asociadas al microclima, a la estructura del paisaje y al grado de intervención antrópica.

La integración de los resultados con la literatura científica permitió interpretar estas diferencias desde una perspectiva ecofisiológica. La brotación foliar, la defoliación, la floración y la fructificación responden a una interacción compleja entre mecanismos fisiológicos internos y factores ambientales, particularmente la disponibilidad hídrica, la temperatura y la radiación solar. Asimismo, la comparación con otras especies del género *Juglans* y con estudios desarrollados en bosques montanos andinos de Colombia y Perú sugiere que *J. neotropica* comparte estrategias fenológicas conservadas dentro de la familia Juglandaceae, aunque presenta una elevada capacidad de ajuste frente a la heterogeneidad ambiental característica de los Andes tropicales.

Uno de los principales aportes de este capítulo corresponde a la incorporación de información primaria obtenida durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), desarrollado por la Universidad Técnica del Norte. Además del monitoreo sistemático de las fenofases en diferentes sistemas de manejo, las observaciones de campo permitieron identificar patrones que no habían sido descritos previamente para la especie, como el aparente **solapamiento fenológico** observado en algunos individuos, donde coexistieron simultáneamente estructuras vegetativas y reproductivas dentro de una misma copa e incluso en una misma rama. Aunque esta observación requiere ser evaluada mediante estudios específicos y series temporales de mayor duración, constituye una hipótesis de trabajo novedosa que abre nuevas perspectivas para el estudio de la plasticidad fenológica y de la arquitectura funcional de *J. neotropica*.

Desde el punto de vista aplicado, los resultados obtenidos poseen implicaciones directas para la conservación y el manejo forestal de la especie. El conocimiento del calendario fenológico facilita la programación de la recolección de semillas, la planificación de la producción de plantas en vivero, la ejecución de prácticas silviculturales y el establecimiento de plantaciones con fines de restauración, conservación o producción. De igual manera, el monitoreo fenológico continuo representa una herramienta útil para evaluar la respuesta de las poblaciones frente a

procesos de variabilidad climática y cambio global, fortaleciendo las estrategias de conservación adaptativa de los bosques montanos andinos.

Finalmente, este capítulo proporciona el marco biológico necesario para comprender los procesos relacionados con la reproducción sexual de *J. neotropica*. La producción de semillas constituye la culminación del ciclo fenológico reproductivo; sin embargo, su aprovechamiento depende de factores adicionales como la madurez fisiológica, la viabilidad, el vigor, la sanidad y la calidad genética del material reproductivo. En consecuencia, el siguiente capítulo aborda el estudio integral de la calidad de las semillas de *J. neotropica*, analizando los criterios técnicos y los métodos de evaluación que sustentan su utilización en programas de propagación, conservación, restauración ecológica y mejoramiento genético.

CAPÍTULO 7

Calidad de las semillas de *Juglans neotropica*

Capítulo

7

Calidad de las semillas de *Juglans neotropica*

Semillas de *J. neotropica* recolectadas en Cuyuja, Napo, Ecuador. Fotografía: Mario Añazco.

La calidad de las semillas constituye un factor determinante para el éxito de los programas de propagación, restauración, conservación y mejoramiento genético de las especies forestales.

Este capítulo sintetiza investigaciones desarrolladas entre 2021 y 2026 por la Carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Técnica del Norte, en el marco del Programa de Investigación *Juglans*, complementadas con estudios realizados por otras instituciones del Ecuador. Se integran resultados obtenidos en trabajos de titulación, proyectos de investigación y publicaciones científicas sobre la calidad genética, física, fisiológica y sanitaria de las semillas de *Juglans neotropica*, constituyendo una base científica para la conservación, el mejoramiento genético, la producción de plantas, la restauración forestal y el manejo sostenible de la especie.

Los estudios sobre semillas desarrollados en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) se realizaron siguiendo los protocolos establecidos en las *International Rules for Seed Testing* de la International Seed Testing Association (ISTA), de acuerdo con las ediciones aplicables a los respectivos períodos de investigación (International Seed Testing Association [ISTA], 2017, 2023, 2025). Este marco metodológico permitió estandarizar los procedimientos empleados para la evaluación de los atributos de calidad de las semillas considerados en las diferentes investigaciones.

En conjunto, esta información integra en una sola obra los principales avances sobre la calidad de las semillas de *J. neotropica* generados en el Ecuador y proporciona un marco conceptual y técnico para la investigación, la propagación y el manejo de la especie.

7.1. Fundamentos para obtener semillas de calidad con fines de reproducción

Concepto de calidad de las semillas de *J. neotropica*

Las semillas de alta calidad constituyen la base para obtener plántulas sanas, vigorosas y con elevada capacidad de establecimiento, condición indispensable para los programas de propagación, restauración, conservación y mejoramiento genético de *J. neotropica*. La evaluación integral de la calidad de las semillas permite determinar su aptitud para la propagación y reducir los riesgos asociados con el empleo de material de baja calidad. En las siguientes secciones se analizan los diferentes componentes que determinan esta calidad y su importancia para la producción de material vegetal.

Los componentes de la calidad de semilla en *J. neotropica*

La calidad integral de las semillas de *J. neotropica* está determinada por cuatro componentes complementarios: calidad genética, física, fisiológica y sanitaria (Figura 7.1). Estos componentes interactúan entre sí y constituyen la base para evaluar el potencial de propagación y el desempeño inicial de las plántulas.

Figura 7.1

Componentes de la calidad de las semillas de Juglans neotropica

Cada uno de estos componentes comprende atributos específicos que permiten evaluar integralmente la calidad de las semillas:

- Parámetros genéticos: se relacionan con la identidad, procedencia y diversidad genética del material reproductivo, aspectos relevantes para conservar la variabilidad y favorecer la adaptación de las futuras poblaciones.

- Parámetros físicos: incluyen la pureza de la semilla, verificando que no haya presencia de materiales extraños o semillas dañadas, lo cual se puede observar en su tamaño, forma y aspecto general.

- Parámetros fisiológicos: se refieren a la viabilidad y el vigor de la semilla, es decir, su capacidad para germinar y convertirse en una plántula normal en condiciones favorables.

- Parámetros sanitarios: describen el estado fitosanitario de las semillas y la presencia o ausencia de organismos capaces de afectar la germinación y el desarrollo inicial de las plántulas.

7.2. Calidad genética

La calidad genética de las semillas de *J. neotropica* fue analizada mediante el estudio de tres componentes fundamentales: la procedencia geográfica, el tipo de fuente semillera y las características fenotípicas de los árboles madre. Estos factores constituyen la base para comprender las diferencias observadas en el potencial reproductivo de la especie, ya que influyen sobre la calidad del material de propagación y, en consecuencia, sobre la germinación, el vigor inicial y el desempeño de las plántulas en vivero.

En las siguientes secciones se analizan estos tres componentes y su contribución a la selección de material reproductivo de alta calidad para programas de conservación, restauración ecológica y mejoramiento genético del nogal andino.

7.2.1. Calidad genética de las semillas de *J. neotropica*

La calidad genética constituye el primer componente de la calidad integral de las semillas, ya que determina el potencial hereditario que será transmitido a la siguiente generación de individuos. En especies forestales de larga vida, como *J. neotropica*, este componente resulta fundamental porque condiciona la adaptación de las futuras plantas al ambiente, su crecimiento, productividad, resistencia a factores bióticos y abióticos, así como su contribución a la conservación de la diversidad genética de las poblaciones naturales.

A diferencia de la calidad física, fisiológica o sanitaria, la calidad genética no puede modificarse durante las etapas de cosecha, procesamiento o almacenamiento de las semillas, pues depende principalmente del origen del material reproductivo, de la variabilidad genética de las poblaciones y de la adecuada selección de los árboles semilleros. En consecuencia, las decisiones tomadas durante la recolección de semillas constituyen el punto de partida para garantizar la producción de plantas con elevado potencial de establecimiento y adaptación.

En *J. neotropica*, la calidad genética está influenciada por diversos factores, entre los que destacan la procedencia geográfica, el tipo de fuente semillera, las características fenotípicas de los árboles madre y el grado de variabilidad genética existente entre poblaciones. Estos factores interactúan con las condiciones ambientales propias de cada sitio, generando diferencias en la calidad del material reproductivo que posteriormente se reflejan en la germinación, el vigor de las plántulas y su desempeño durante las primeras etapas del establecimiento.

Las investigaciones desarrolladas por el Programa de Investigación *Juglans* (Universidad Técnica del Norte, 2021–2026), complementadas con estudios realizados por otras instituciones del Ecuador, muestran diferencias entre procedencias y fuentes semilleras. Estas diferencias pueden reflejar la interacción de factores genéticos, ambientales, fisiológicos y de manejo; por ello, no deben atribuirse exclusivamente a adaptación local sin ensayos de procedencias, progenies o evidencia molecular específica.

En las siguientes secciones se analizan los principales factores que determinan la calidad genética de las semillas de *J. neotropica*, enfatizando el efecto de la procedencia

geográfica, las fuentes semilleras y las características fenotípicas de los árboles madre sobre el potencial reproductivo de la especie.

7.2.2. Influencia de la procedencia geográfica sobre la calidad genética de las semillas

La procedencia geográfica constituye uno de los factores más importantes que determinan la calidad genética de las semillas forestales, debido a que las poblaciones naturales desarrollan procesos de adaptación local en respuesta a las condiciones ambientales donde evolucionan. Variables como la latitud, la altitud, el clima, los suelos y la historia evolutiva de cada población influyen sobre las características hereditarias de los árboles madre y, por consiguiente, sobre el desempeño reproductivo de sus semillas. En *J. neotropica*, la evaluación de la procedencia permite identificar poblaciones con mayor potencial para programas de restauración ecológica, conservación genética, establecimiento de plantaciones y mejoramiento genético.

7.2.2.1. Latitud y su influencia sobre la calidad genética de las semillas

La ubicación geográfica del Ecuador, atravesado por la línea ecuatorial, genera poblaciones naturales de *J. neotropica* distribuidas tanto al norte como al sur de la línea equinoccial. Aunque las diferencias latitudinales son relativamente pequeñas en comparación con otros países, las variaciones climáticas, topográficas y ecológicas asociadas pueden influir sobre la adaptación local de las poblaciones y, en consecuencia, sobre la calidad genética del material reproductivo. Con el propósito de evaluar este efecto, se comparó el porcentaje de germinación de semillas provenientes de procedencias del norte y del sur del Ecuador, sin aplicación de tratamientos pregerminativos.

La comparación se realizó a partir del porcentaje de germinación registrado a los 90 días, sin aplicación de tratamientos pregerminativos, en procedencias del norte y del sur del país.

En el **norte**, la procedencia **Yuyucocha** alcanzó un **55 %** de germinación, mostrando un comportamiento favorable dentro del rango esperado para semillas sin pretratamiento. Este valor se ubica por encima del promedio general de las procedencias del sur, lo que sugiere una mayor viabilidad fisiológica de las semillas y posiblemente mejores condiciones de maduración y recolección (Cué et al., 2024).

En contraste, en el **sur** se observaron valores más variables entre sitios. El **Tundo testigo** registró **50,67 %**, mientras que el **Parque La Argelia** alcanzó **53,33 %** (Márquez, 2024), porcentajes cercanos al valor del norte y relativamente consistentes. No obstante, la procedencia de **Chuquiribamba** presentó un **31,1 %** (Villacis, 2013), evidenciando una reducción significativa en la capacidad de germinación. Esta diferencia podría atribuirse a factores como el estado fisiológico de las semillas al momento de la recolección, las condiciones edafoclimáticas del sitio de origen, o la presencia de dormancia más marcada en esta procedencia.

De manera comparativa, el promedio general de germinación del sur (45,03 %) fue inferior al observado en el norte (55 %) para los lotes evaluados. Esta diferencia describe el comportamiento de las muestras analizadas, pero no permite atribuir el

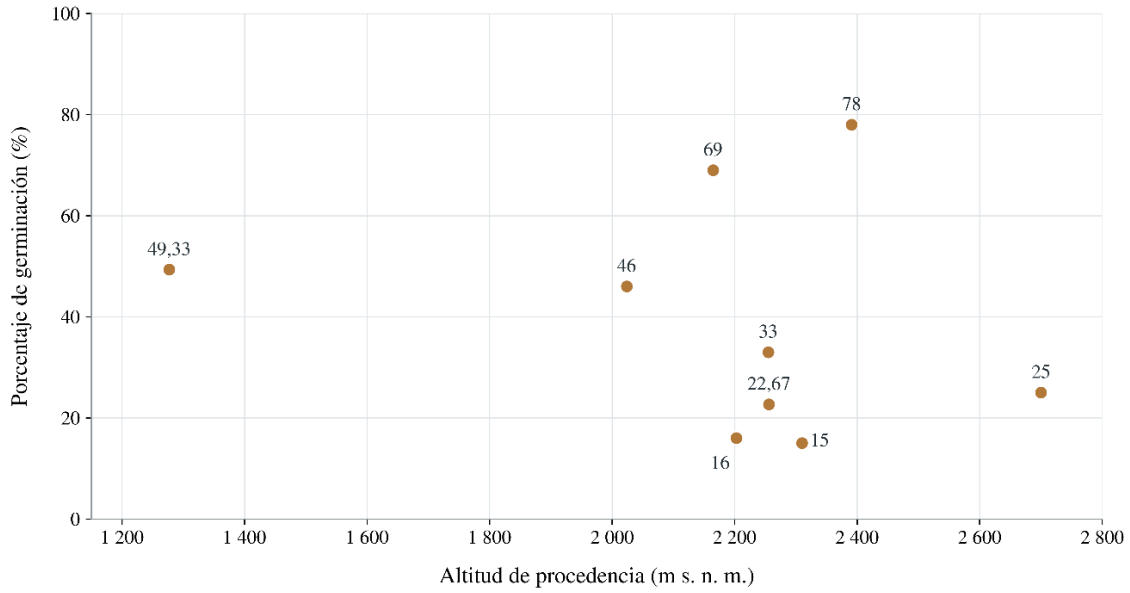
desempeño germinativo exclusivamente a la latitud o a la región de origen, debido a la posible influencia del estado fisiológico, la madurez, el manejo poscosecha y las condiciones particulares de cada procedencia.

7.2.2.2. Altitud sobre el nivel del mar y su influencia sobre la calidad genética de las semillas

Además de la latitud, la altitud constituye uno de los principales gradientes ecológicos que condicionan la diferenciación de las poblaciones forestales andinas. Los cambios altitudinales modifican la temperatura, la precipitación, la humedad relativa, la radiación solar y otras variables ambientales que pueden ejercer presión de selección sobre las poblaciones naturales de *J. neotropica*. Como resultado, las semillas provenientes de diferentes pisos altitudinales pueden presentar variaciones en su comportamiento germinativo y en otros atributos asociados a su calidad genética (Figura 7.2).

Figura 7.2

Relación entre porcentaje de germinación y procedencia altitudinal de Juglans neotropica



Nota. Elaborado por los autores a partir de los resultados experimentales.

Las procedencias ubicadas a 2 391 y 2 165 m s.n.m. presentaron los mayores porcentajes de germinación (78 % y 69 %, respectivamente), mientras que las poblaciones localizadas a 2 203, 2 256 y 2 310 m s.n.m. registraron valores inferiores al 25 %. Estos resultados evidencian una marcada variabilidad entre poblaciones y sugieren que determinadas condiciones ambientales favorecen la producción de semillas con mayor potencial germinativo. No obstante, la ausencia de una relación lineal entre altitud y germinación indica que el gradiente altitudinal, por sí solo, no explica completamente las diferencias observadas, interviniendo también factores asociados al estado fisiológico de los árboles madre, las características edafoclimáticas locales y la variabilidad genética entre poblaciones.

7.2.2.3. Integración de los efectos de la procedencia

Los resultados obtenidos evidencian diferencias de comportamiento germinativo entre procedencias de *J. neotropica*. En conjunto, los análisis de latitud y altitud muestran una variación que puede responder a la interacción entre factores genéticos, ambientales y de manejo propios de cada sitio de origen. Por tanto, estos resultados deben interpretarse como evidencia de variación entre procedencias y no como demostración de una relación causal entre latitud o altitud y calidad genética.

Estos resultados aportan criterios técnicos para la selección de procedencias destinadas a programas de viverización, restauración ecológica, conservación genética y mejoramiento genético de la especie. No obstante, la procedencia representa únicamente el primer nivel de selección del material reproductivo. La expresión de su potencial genético también depende de la calidad de las fuentes semilleras y de las características fenotípicas de los árboles madre, aspectos que se analizan en las siguientes secciones.

7.2.3. Influencia de la fuente semillera sobre la calidad genética de las semillas

La fuente semillera constituye el segundo componente de la calidad genética de las semillas, ya que define el origen biológico del material reproductivo y condiciona el potencial hereditario de las futuras plantas. En especies forestales como *J. neotropica*, la selección de fuentes semilleras adecuadas permite conservar la variabilidad genética, incrementar el potencial germinativo y mejorar el desempeño de las plántulas destinadas a programas de restauración ecológica, establecimiento de plantaciones y conservación de recursos genéticos. En Ecuador, la clasificación y manejo de las fuentes semilleras se encuentra regulada por la normativa forestal nacional, la cual establece diferentes categorías de acuerdo con el grado de selección y mejoramiento genético.

7.2.3.1. Clasificación de las fuentes semilleras en el Ecuador

El Ministerio del Ambiente del Ecuador, mediante el Acuerdo Ministerial No. 3 (Registro Oficial No. 269 del 9 de febrero de 2004), estableció la Norma de Semillas Forestales, la cual reconoce cinco categorías de fuentes semilleras según su grado de selección y manejo genético:

- Huertos semilleros comprobados.
- Huertos semilleros no comprobados.
- Rodales semilleros.
- Fuentes semilleras seleccionadas.
- Fuentes semilleras identificadas (MAE, 2004).

En *J. neotropica*, debido a la limitada disponibilidad de rodales manejados específicamente para producción de semillas, predominan actualmente las fuentes semilleras identificadas y las fuentes semilleras seleccionadas, las cuales constituyen la principal base para los programas de propagación desarrollados en el Ecuador.

La información experimental presentada en esta sección proviene principalmente de investigaciones desarrolladas en el marco del Programa de Investigación *Juglans*

(Universidad Técnica del Norte, 2021–2026), complementadas con estudios realizados por otras instituciones del Ecuador.

7.2.3.2. Influencia de la fuente semillera sobre la germinación

Con el propósito de evaluar la influencia de diferentes fuentes semilleras sobre el comportamiento germinativo de las semillas de *J. neotropica*, Ramírez et al. (2025) compararon material procedente de tres ecosistemas representativos del norte del Ecuador: una regeneración natural en Cuyuja, una plantación pura en Natabuela y un sistema agroforestal en Pimampiro. Las semillas fueron evaluadas bajo condiciones controladas de vivero durante 150 días, considerando el inicio de la germinación, el porcentaje de germinación y el índice de germinación (Tabla 7.1).

Tabla 7.1

Germinación de semillas de Juglans neotropica según la fuente semillera

Ecosistema	Inicio de la germinación (días)	Porcentaje de germinación (%)	Índice de germinación
Natabuela: Plantación pura	73	32,50	38,32
Cuyuja: Regeneración natural	55	15	15,10
Pimapiro: Sistema agroforestal	57	69	72,76

Nota. Elaborado a partir de los resultados de Ramírez et al. (2025). El ensayo se realizó bajo condiciones controladas de vivero durante 150 días.

Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre las tres fuentes semilleras evaluadas. El sistema agroforestal de Pimampiro presentó el mayor porcentaje de germinación (69 %) y el mayor índice de germinación (72,76). La plantación pura de Natabuela mostró un comportamiento intermedio, mientras que la regeneración natural de Cuyuja registró el menor desempeño germinativo, a pesar de presentar semillas físicamente íntegras. Estas diferencias sugieren que las condiciones ecológicas y de manejo asociadas con cada fuente semillera pueden influir en la calidad fisiológica del material reproductivo.

El análisis de las semillas no germinadas indicó además diferencias en su condición fisiológica. En Pimampiro una parte importante de las semillas conservó viabilidad potencial, mientras que en Cuyuja predominó la dormancia y el deterioro de los tejidos, evidenciando limitaciones para la expresión del potencial germinativo. Las diferencias entre fuentes semilleras fueron estadísticamente significativas (MANOVA, $p < 0{,}001$), evidenciando una asociación entre el origen del material reproductivo y el comportamiento germinativo de la especie.

En conjunto, estos resultados muestran que la selección de la fuente semillera puede estar asociada con respuestas contrastantes en el comportamiento germinativo. No obstante, los parámetros evaluados —inicio, porcentaje e índice de germinación— corresponden principalmente a atributos de calidad fisiológica y no constituyen, por sí mismos, una evaluación directa de la calidad genética.

7.2.3.3. Integración del efecto de la fuente semillera

Los resultados obtenidos demuestran que la fuente semillera constituye un componente determinante de la calidad genética de las semillas de *J. neotropica*. Aunque la procedencia geográfica define el marco general de adaptación de las poblaciones, las características propias de cada fuente semillera explican diferencias importantes en la germinación, el vigor y la viabilidad de las semillas. En este estudio, los sistemas agroforestales presentaron el mejor desempeño reproductivo, lo que evidencia su potencial como proveedores de material reproductivo para programas de restauración ecológica y producción de plantas.

No obstante, la calidad genética de una fuente semillera no depende únicamente del tipo de ecosistema donde se recolectan las semillas, sino también de las características fenotípicas de los árboles madre que la conforman. La selección de individuos con adecuada conformación, vigor, sanidad y capacidad reproductiva constituye el siguiente nivel de evaluación para garantizar la obtención de material reproductivo de alta calidad, aspecto que se analiza en la siguiente sección.

7.2.4. Selección fenotípica de árboles semilleros

Una vez definida la procedencia y seleccionada la fuente semillera, el siguiente nivel de evaluación corresponde a la identificación de árboles madre con características fenotípicas favorables. La selección fenotípica constituye una herramienta práctica para reconocer individuos potencialmente adecuados para la recolección de semillas, especialmente cuando no se dispone de ensayos de progenie ni de información molecular sobre las poblaciones.

El fenotipo corresponde al conjunto de características observables de un árbol, resultantes de la interacción entre su constitución genética y las condiciones ambientales en las que se desarrolla. Por esta razón, los atributos fenotípicos no deben interpretarse como una expresión exclusivamente genética ni como una garantía directa de superioridad heredable. Sin embargo, permiten realizar una selección inicial de árboles semilleros con adecuada conformación, vigor, sanidad aparente y capacidad reproductiva.

En *J. neotropica*, la evaluación fenotípica de los árboles madre complementa la selección de procedencias y fuentes semilleras, y aporta criterios para reducir la recolección de semillas en individuos débiles, mal conformados, enfermos o con baja producción de frutos. Su aplicación resulta especialmente relevante en fuentes semilleras identificadas y seleccionadas, que constituyen las categorías más utilizadas para la obtención de semillas de la especie en el Ecuador.

7.2.4.1. Características fenotípicas de los árboles semilleros

La selección de árboles semilleros de *J. neotropica* debe considerar conjuntamente atributos dasométricos, morfológicos, sanitarios y reproductivos. Entre los principales criterios se incluyen el diámetro del tronco a 1,30 m del suelo, la altura total, la altura comercial, la forma y dimensiones de la copa, la rectitud y conformación del fuste, el ángulo de inserción de las ramas, la altura de bifurcación, el estado fitosanitario aparente y la producción y condición de los frutos.

Estrada (2023) evaluó árboles de *J. neotropica* pertenecientes a tres fuentes semilleras del norte del Ecuador: un sistema agroforestal y una plantación establecidos en Natabuela (Imbabura), y una población de regeneración natural ubicada en Cuyuja (Napo). La evaluación comprendió variables cualitativas relacionadas con la conformación y estado del árbol, así como variables cuantitativas o dasométricas, entre ellas el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total y la altura comercial.

Los resultados evidenciaron diferencias entre las fuentes semilleras (Figura 7.3). El sistema agroforestal presentó la mayor puntuación promedio en las variables fenotípicas (37,2 puntos), seguido por la plantación (34,4 puntos) y la regeneración natural (31,2 puntos). En contraste, la regeneración natural registró la mayor puntuación promedio en las variables dasométricas (7,8 puntos), mientras que el sistema agroforestal y la plantación presentaron valores similares (6,6 puntos).

Estas diferencias indican que las características morfológicas y dasométricas no necesariamente responden de manera paralela. Un mayor crecimiento en diámetro o altura no implica, por sí solo, una mejor expresión de los atributos fenotípicos asociados a la calidad de los árboles semilleros. En consecuencia, la selección de árboles madre debe fundamentarse en una evaluación integral que combine criterios fenotípicos, dasométricos y reproductivos antes de proceder a la recolección de semillas.

7.2.4.2. Variación fenotípica y desempeño reproductivo

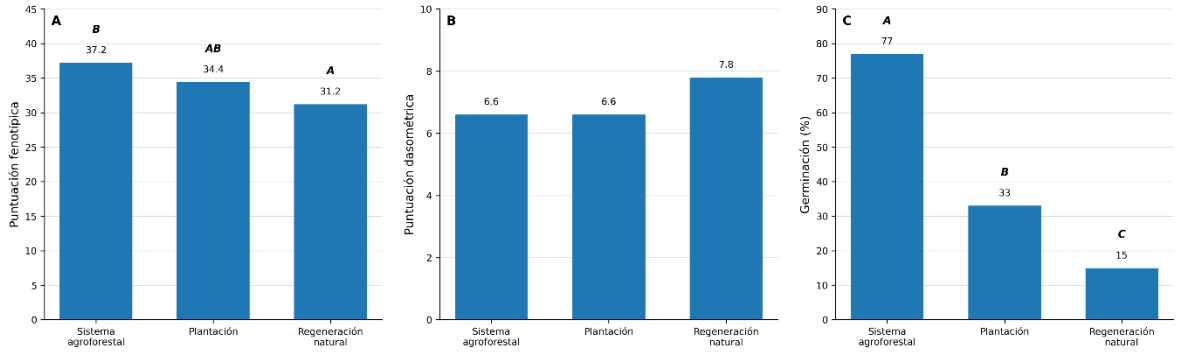
La variación fenotípica representa la amplitud de expresión de las características observables entre individuos de una misma población o entre poblaciones y fuentes semilleras. Esta variación resulta de la interacción entre la constitución genética de los árboles y las condiciones ambientales donde se desarrollan. Su evaluación permite identificar árboles con características fenotípicas y dasométricas favorables para la producción de material reproductivo. No obstante, las diferencias fenotípicas observadas no pueden atribuirse exclusivamente a factores genéticos sin el respaldo de ensayos de procedencias, progenies o análisis mediante marcadores moleculares.

En el estudio realizado por Estrada (2023), la regeneración natural de Cuyuja presentó los mayores valores y la mayor heterogeneidad en diámetro, altura total y altura comercial. Los árboles alcanzaron diámetros entre 35,0 y 43,6 cm y mostraron una considerable variación en altura, lo que podría estar asociado con diferencias en edad, micrositio, competencia y condiciones de crecimiento. En contraste, el sistema agroforestal presentó valores intermedios y relativamente homogéneos, con diámetros entre 25,2 y 29,8 cm y una altura total promedio cercana a 10,8 m. Por su parte, la plantación en bloque mostró mayor uniformidad en las variables de crecimiento, probablemente como consecuencia de una edad similar de los individuos, una densidad relativamente constante y prácticas de manejo homogéneas.

Las diferencias descritas anteriormente se resumen en la Figura 7.3, donde se comparan las puntuaciones medias de las variables fenotípicas (A), las variables dasométricas (B) y el porcentaje de germinación de las semillas (C) para las tres fuentes semilleras evaluadas.

Figura 7.3

Características fenotípicas, dasométricas y germinación de semillas de árboles semilleros de Juglans neotropica en tres fuentes semilleras



Nota. El panel A representa la puntuación media de las variables fenotípicas; el panel B, la puntuación media de las variables dasométricas; y el panel C, el porcentaje medio de germinación. En los paneles A y C, medias con una letra común no difieren significativamente ($p > 0,05$). Adaptado de Estrada (2023).

Las diferencias más marcadas se observaron en el desempeño reproductivo de las semillas (Figura 7.3C). Las semillas procedentes del sistema agroforestal alcanzaron porcentajes de germinación entre 65 y 83 %, con una media de 77,2 %, significativamente superior a la registrada en la plantación (33,0 %) y en la regeneración natural (15,2 %). Estos resultados evidencian que las fuentes semilleras difieren no solo en sus características fenotípicas y dasométricas, sino también en la capacidad germinativa del material reproductivo.

El análisis integrado de la Figura 7.3 muestra que una mayor puntuación dasométrica no necesariamente se traduce en un mayor porcentaje de germinación. Aunque la regeneración natural presentó los valores promedio más altos en las variables dasométricas (Figura 7.3B), registró el menor desempeño germinativo (Figura 7.3C). En contraste, el sistema agroforestal alcanzó la mayor puntuación fenotípica (Figura 7.3A) y el mayor porcentaje de germinación, lo que sugiere que la conformación fenotípica de los árboles y las condiciones de crecimiento pueden favorecer la producción de semillas de mejor calidad fisiológica. Sin embargo, esta relación debe interpretarse con cautela, ya que el estudio no evaluó directamente los mecanismos genéticos responsables de estas diferencias.

En consecuencia, la selección de árboles semilleros no debe sustentarse únicamente en variables dasométricas como el diámetro o la altura, ni exclusivamente en la apariencia externa de los individuos. Una evaluación integral debe considerar conjuntamente la procedencia geográfica, la fuente semillera, las características fenotípicas, el estado sanitario, la producción de frutos y el desempeño fisiológico de las semillas, con el propósito de incrementar la probabilidad de obtener material reproductivo de alta calidad para programas de propagación, restauración ecológica y mejoramiento genético de *J. neotropica*.

7.2.4.3. Integración de la selección fenotípica

La evaluación conjunta de las tres fuentes semilleras evidencia que las características fenotípicas de los árboles madre constituyen un criterio fundamental para la selección del material reproductivo, aunque por sí solas no permiten explicar completamente la calidad genética y el desempeño reproductivo de las semillas de *J. neotropica*. Como se observa en la Figura 7.3, la regeneración natural presentó los mayores valores en las variables dasométricas, mientras que el sistema agroforestal registró las mayores puntuaciones fenotípicas y el mejor porcentaje de germinación. Estos resultados muestran que el crecimiento de los árboles, la expresión de sus características fenotípicas y la capacidad germinativa de las semillas no siempre presentan una relación directa, por lo que la selección de árboles semilleros debe sustentarse en una evaluación integral de múltiples atributos.

Desde una perspectiva de conservación, las poblaciones naturales representan importantes reservorios de variabilidad biológica y no deben descartarse únicamente por registrar bajos porcentajes de germinación en un determinado lote de semillas. La calidad del material reproductivo puede mejorar mediante una selección más rigurosa de árboles madre, una adecuada determinación del estado de madurez de los frutos, un manejo poscosecha apropiado y la aplicación de tratamientos pregerminativos. Desde una perspectiva productiva, los sistemas agroforestales pueden constituir fuentes semilleras promisorias, siempre que mantengan una adecuada diversidad genética, un número suficiente de individuos reproductivos no emparentados y condiciones favorables para la polinización y el desarrollo de los frutos.

En consecuencia, la selección del material reproductivo de *J. neotropica* debe desarrollarse de manera jerárquica: primero se identifica una procedencia apropiada; posteriormente se evalúa la fuente semillera; y finalmente se seleccionan árboles madre con características fenotípicas, sanitarias y reproductivas favorables. Esta secuencia permite fortalecer la calidad genética del material recolectado y constituye el punto de partida para la evaluación de los atributos físicos, fisiológicos y sanitarios de las semillas, componentes que, en conjunto, determinan su calidad integral y el potencial de producción de plantas en vivero.

7.2.5. Gestión participativa de fuentes semilleras

La gestión participativa constituye una estrategia para la conservación y el manejo sostenible de los recursos genéticos forestales, al integrar la participación de propietarios de predios, comunidades rurales, universidades, instituciones públicas, sector privado y centros de investigación en la identificación, evaluación y manejo de árboles y fuentes semilleras. En especies nativas amenazadas como *J. neotropica*, este enfoque favorece la disponibilidad de material reproductivo de calidad y fortalece las acciones de conservación, restauración ecológica y producción forestal sostenible.

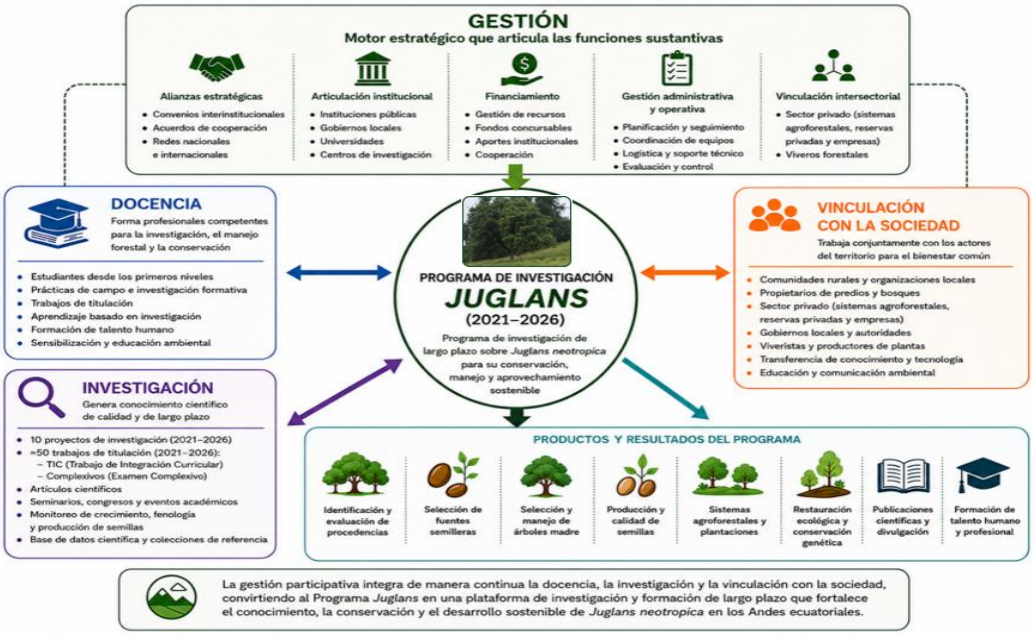
En el **Programa de Investigación *Juglans* (Universidad Técnica del Norte, 2021–2026)**, la gestión participativa se estructuró sobre las cuatro funciones sustantivas de la universidad: **docencia, investigación, vinculación con la sociedad y gestión**. A diferencia de un proyecto de investigación convencional, cuya ejecución generalmente concluye al finalizar el financiamiento o el cumplimiento de objetivos específicos, el

programa se concibió como una plataforma permanente de generación de conocimiento, donde múltiples proyectos, trabajos de titulación, publicaciones científicas y actividades de vinculación se desarrollaron de manera articulada alrededor de un objetivo común: generar bases científicas para la conservación, propagación, manejo forestal y aprovechamiento sostenible de *J. neotropica*.

La interacción entre las cuatro funciones sustantivas permitió estructurar un modelo universitario de gestión participativa, cuya organización general se presenta en la Figura 7.4.

Figura 7.4

Modelo universitario de gestión participativa del Programa de Investigación Juglans (Universidad Técnica del Norte, 2021–2026)



Nota. La figura representa esquemáticamente el modelo universitario de gestión participativa implementado por el Programa de Investigación *Juglans* de la Universidad Técnica del Norte durante el periodo 2021–2026. El modelo integra las funciones sustantivas de la universidad, los actores del territorio y los principales productos científicos generados. La fotografía central muestra un árbol plantado de *J. neotropica* en un pastizal dominado por kikuyo (*Cenchrus clandestinus*), en la comunidad indígena de Ramosloma, provincia de Cañar, Ecuador.

Como se observa en la Figura 7.4, la **gestión** constituyó el eje estratégico e institucional que articuló las demás funciones sustantivas mediante el establecimiento de convenios, alianzas de cooperación y mecanismos de coordinación con instituciones públicas, gobiernos locales, propietarios de predios, comunidades rurales y actores del sector privado. Esta articulación posibilitó incorporar poblaciones naturales, plantaciones, sistemas agroforestales y otros sitios de estudio como laboratorios permanentes para la investigación, facilitando el seguimiento de árboles establecidos

décadas atrás y la generación de información de largo plazo sobre crecimiento, producción de semillas, calidad genética y manejo silvicultural de *J. neotropica*.

Paralelamente, la **docencia** permitió integrar de manera continua a estudiantes de Ingeniería Forestal en las diferentes etapas del programa, desde las prácticas de campo y actividades de investigación formativa hasta el desarrollo de trabajos de titulación, proyectos científicos y publicaciones. La **investigación** generó información científica sobre la biología, propagación, ecología, agroforestería, crecimiento, economía y conservación de la especie, mientras que la **vinculación con la sociedad** propició el trabajo conjunto con comunidades rurales, propietarios de predios, viveristas, instituciones públicas y organizaciones locales para la identificación y manejo de árboles y fuentes semilleras.

La integración de estas cuatro funciones sustantivas permitió consolidar una red colaborativa para el estudio de *J. neotropica*, transformando sitios de producción, sistemas agroforestales, plantaciones y remanentes de bosque nativo en escenarios permanentes de investigación, formación profesional y generación de conocimiento. Este modelo facilitó la continuidad de las investigaciones durante varios años y fortaleció simultáneamente la formación de talento humano, la conservación de los recursos genéticos y el desarrollo de programas de restauración ecológica y manejo forestal.

En consecuencia, la gestión participativa representa el mecanismo mediante el cual los criterios técnicos para la selección de procedencias, fuentes semilleras y árboles madre pueden implementarse de manera efectiva en el territorio. La articulación entre universidad, comunidades, propietarios, instituciones públicas y sector privado fortalece la sostenibilidad de los programas de conservación y garantiza una mayor disponibilidad de material reproductivo de calidad para las futuras iniciativas de propagación y manejo forestal de *J. neotropica*.

7.2.6. Integración de la calidad genética de las semillas

La calidad genética de las semillas de *J. neotropica* constituye el primer componente de la calidad integral del material reproductivo y determina, en gran medida, el potencial biológico de las futuras plantas. Los resultados presentados en este capítulo evidencian que dicha calidad depende de una secuencia jerárquica de decisiones que inicia con la selección de la procedencia geográfica, continúa con la identificación de fuentes semilleras adecuadas y culmina con la selección de árboles madre que reúnan características fenotípicas, sanitarias y reproductivas favorables.

Estos criterios no actúan de manera independiente, sino que interactúan entre sí y deben complementarse mediante estrategias de gestión participativa que involucren a propietarios de predios, comunidades rurales, instituciones públicas, sector privado y universidades. Este enfoque permite conservar la variabilidad genética de la especie, mejorar la calidad del material reproductivo y fortalecer los programas de restauración ecológica, producción de plantas y mejoramiento genético.

Sin embargo, la calidad genética por sí sola no garantiza el éxito de la propagación. Una semilla procedente de árboles superiores puede presentar limitaciones derivadas de su condición física, fisiológica o sanitaria, las cuales afectan directamente la

germinación, el vigor y el establecimiento de las plántulas. Por esta razón, la evaluación de la calidad genética constituye únicamente la primera etapa dentro del proceso integral de valoración de las semillas de *J. neotropica*.

En consecuencia, una vez seleccionadas las procedencias, fuentes semilleras y árboles madre con mayor potencial genético, resulta necesario evaluar las características físicas, fisiológicas y sanitarias de las semillas, componentes que determinan su comportamiento durante el almacenamiento, la germinación y la producción de plantas en vivero. Estos aspectos se desarrollan en las secciones siguientes del presente capítulo.

7.3. Calidad física de las semillas de *J. neotropica* en Ecuador

La calidad física constituye uno de los componentes fundamentales de la calidad integral de las semillas, ya que describe los atributos estructurales que condicionan su conservación, manipulación y potencial de establecimiento. En *J. neotropica*, especie que produce semillas recalcitrantes, variables como la pureza del lote, el contenido de humedad, el tamaño y el peso individual adquieren especial importancia debido a su influencia sobre las reservas del embrión, el vigor inicial y el desempeño de las plántulas durante la fase de viverización. Estas características representan el primer nivel de evaluación de la calidad de las semillas y constituyen un criterio práctico para seleccionar el material de propagación destinado a programas de restauración ecológica, conservación genética y establecimiento de plantaciones forestales.

Los resultados obtenidos en diferentes procedencias del Ecuador evidencian que la calidad física presenta una marcada variabilidad geográfica. Las poblaciones del norte y sur del país muestran diferencias consistentes en pureza, contenido de humedad, tamaño y peso de las semillas, lo que sugiere la influencia conjunta de factores genéticos, ambientales y de manejo durante la formación y recolección de los frutos. Estas diferencias adquieren especial relevancia porque condicionan el potencial de germinación y el vigor inicial de las plántulas, aspectos que posteriormente se analizan en la calidad fisiológica de las semillas.

7.3.1. Pureza de las semillas

La pureza física expresa la proporción de semillas sanas y completas presentes en un lote, excluyendo impurezas, restos vegetales, frutos dañados o semillas vacías. Este parámetro constituye uno de los primeros indicadores de calidad utilizados en tecnología de semillas, ya que determina la eficiencia del material destinado a propagación y refleja, de manera indirecta, la calidad del proceso de cosecha, beneficio y almacenamiento.

En las procedencias evaluadas de *J. neotropica*, la pureza presentó un amplio rango de variación, comprendido entre 67,60 % y 99,12 %. Las poblaciones del norte del Ecuador evidenciaron una mayor heterogeneidad, registrándose valores relativamente bajos en sistemas agroforestales de Pimampiro (67,60 %), mientras que en la regeneración natural de Cuyuja se alcanzaron valores cercanos al 95 %. En contraste, las procedencias del sur mostraron una notable uniformidad, con porcentajes superiores al 98 % en El Tundo (98,92 %), La Victoria (99,12 %) y La Argelia (98,96 %).

La elevada pureza observada en las procedencias del sur indica una mayor integridad física de los lotes de semillas, condición que puede asociarse con procesos más eficientes de floración, fecundación y llenado de frutos, así como con prácticas de cosecha y selección más rigurosas. Desde el punto de vista operativo, lotes con alta pureza reducen pérdidas durante el beneficio de semillas, incrementan la uniformidad de la siembra y mejoran la eficiencia de los programas de propagación forestal.

Por el contrario, la mayor variabilidad observada en las procedencias del norte no necesariamente representa una limitación genética, sino que probablemente refleja diferencias locales en las condiciones ambientales, la estructura de las poblaciones, el grado de fragmentación de los bosques y las prácticas de recolección. En consecuencia, la pureza debe interpretarse como un atributo del lote de semillas y no exclusivamente como una característica inherente a la procedencia.

7.3.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad constituye uno de los parámetros más importantes en la evaluación de semillas recalcitrantes, debido a que determina su capacidad de conservación y su permanencia fisiológicamente activa después de la cosecha. A diferencia de las semillas ortodoxas, las semillas recalcitrantes no toleran procesos intensos de desecación, por lo que la pérdida de agua puede provocar daños irreversibles en las membranas celulares y reducir rápidamente la viabilidad.

En *J. neotropica*, el contenido de humedad mostró diferencias marcadas entre regiones. Las procedencias del norte registraron valores comprendidos entre 18 % (Yuyucocha y Chorlaví) y 35 % (Natabuela), mientras que en el sur se observaron contenidos considerablemente mayores, alcanzando 51 % en La Argelia, 64 % en El Tundo y hasta 73 % en La Victoria.

Los elevados contenidos de humedad observados son consistentes con el comportamiento recalcitrante atribuido a las semillas de *J. neotropic*a, pero el contenido de humedad por sí solo no constituye una prueba suficiente para clasificar su comportamiento de almacenamiento. Esta condición implica especial sensibilidad a la desecación y limita el almacenamiento prolongado, por lo que el manejo poscosecha debe minimizar pérdidas de humedad y retrasos antes de la siembra.

En contraste, los menores contenidos de humedad observados en algunas procedencias del norte podrían facilitar parcialmente las labores de manipulación y transporte; sin embargo, también incrementan el riesgo de pérdida de viabilidad cuando las semillas continúan deshidratándose por debajo del umbral fisiológico crítico. En consecuencia, el manejo posterior a la cosecha debe orientarse a conservar la humedad natural de las semillas y minimizar el tiempo transcurrido entre la recolección y la siembra, especialmente en programas de viverización y restauración ecológica.

7.3.3. Número de semillas por kilogramo

El número de semillas por kilogramo constituye un indicador indirecto del tamaño y peso individual de las semillas. En términos generales, un mayor número de semillas por unidad de peso corresponde a semillas de menor tamaño, mientras que un menor

número indica semillas de mayor masa y, por lo tanto, con una mayor cantidad de reservas disponibles para el desarrollo inicial del embrión.

En las procedencias evaluadas, este parámetro varió entre 30 y 49 semillas por kilogramo. Las poblaciones del norte presentaron los valores más altos (32 a 49 semillas kg^{-1}), indicando semillas relativamente pequeñas. Por el contrario, las procedencias del sur registraron entre 30 y 35 semillas kg^{-1}, lo que corresponde a semillas de mayor tamaño y peso individual.

Este patrón coincide con lo reportado para diversas especies del género *Juglans*, donde el mayor tamaño de la semilla suele asociarse con una mayor disponibilidad de reservas energéticas y un mejor desempeño durante las primeras etapas del establecimiento (Palacios et al., 2025c). Aunque el número de semillas por kilogramo constituye un indicador práctico de calidad física, su interpretación debe complementarse con la evaluación del tamaño, peso y calidad fisiológica de las semillas, ya que estos factores actúan de manera conjunta sobre el potencial germinativo.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que las procedencias del sur del Ecuador tienden a producir lotes de semillas más uniformes, de mayor tamaño y con mayores contenidos de humedad, características que sugieren una mayor inversión de recursos durante el desarrollo del fruto. Por su parte, las procedencias del norte presentan una mayor variabilidad física, condición que puede representar una importante fuente de diversidad para programas de conservación y mejoramiento genético. Estas diferencias regionales constituyen la base para comprender la variación morfométrica de las semillas y su influencia sobre la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas, aspectos que se desarrollan en los apartados siguientes.

7.3.4. Tamaño de las semillas

El tamaño constituye uno de los principales atributos morfológicos considerados en la caracterización física del material de propagación. En *J. neotropica*, la variación en el peso y las dimensiones de las semillas permite identificar diferencias entre individuos, procedencias y lotes, las cuales pueden estar asociadas con factores genéticos, ambientales y fisiológicos que actúan durante la formación y maduración de los frutos.

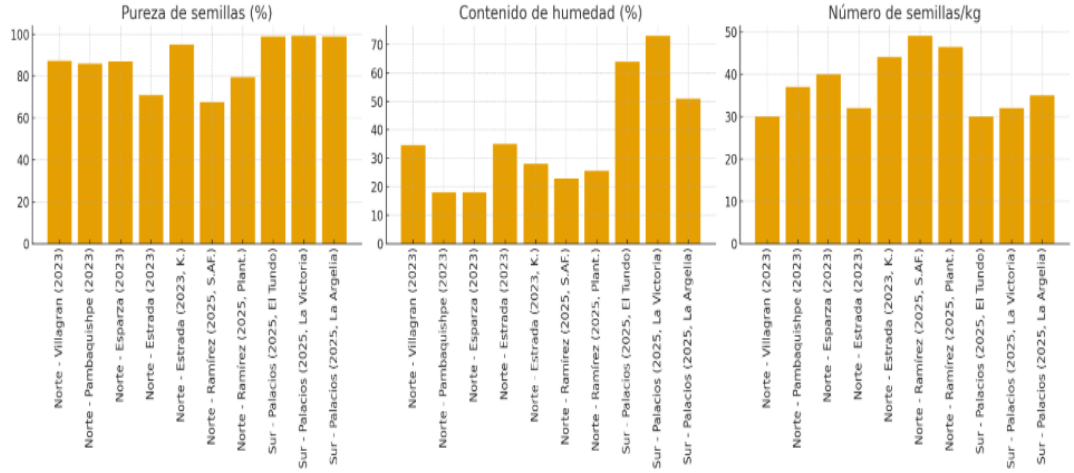
En especies del género *Juglans*, el tamaño y el peso de las semillas constituyen atributos relevantes para la caracterización física del material de propagación. En Colombia, Ramírez (2022) reportó para *J. neotropica* una longitud promedio de 37,17 mm, un diámetro de 35,15 mm y un peso de 20,47 g. Asimismo, encontró una fuerte relación positiva entre el peso y el diámetro de las semillas ($R^2 = 0,80$), lo que indica que el incremento del diámetro estuvo estrechamente asociado con un mayor peso del material evaluado. En Ecuador, Orellana Armijos (2018) registró para semillas procedentes de Loja una longitud promedio de 36,4 mm y un diámetro transversal de 37,5 mm. Estos antecedentes proporcionan valores de referencia para comparar la variación morfométrica de las semillas de *J. neotropica* entre diferentes procedencias de la región andina.

Con el propósito de caracterizar la variabilidad morfométrica de las semillas en Ecuador, se evaluaron procedencias representativas del norte (Carchi e Imbabura) y del sur (Loja y Azuay), clasificando las semillas en tres categorías de tamaño: pequeñas,

medianas y grandes. Para cada categoría se determinaron el peso promedio, la longitud y el diámetro, variables utilizadas para caracterizar cuantitativamente las diferencias morfológicas entre los materiales evaluados (Figura 7.5).

Figura 7.5

Variación morfológica de semillas de J. neotropica procedentes de diferentes regiones del Ecuador



Nota. Adaptado de Palacios et al. (2025c) y Estrada (2023).

La Figura 7.5 muestra la variación morfológica de las semillas de *J. neotropica* procedentes de diferentes regiones del Ecuador, con diferencias visibles en tamaño y forma entre los materiales analizados. Estas diferencias fueron posteriormente cuantificadas mediante mediciones de peso, longitud y diámetro, cuyos valores promedio se presentan en la Tabla 7.2. La integración de la evidencia visual y del análisis morfométrico permite caracterizar la variación física entre procedencias y proporciona una base para analizar posteriormente su posible relación con la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas.

Tabla 7.2

Promedios de peso, longitud y diámetro de semillas de Juglans neotropica por región y categoría de tamaño en el Ecuador

Tamaño de semilla	Región	Peso prom. (g)	Longitud prom. (mm)	Diámetro prom. (mm)
Pequeñas	Norte	12,82	31,34	29,61
Medianas	Norte	16,70	35,30	33,46
Grandes	Norte	22,91	39,01	39,10
Pequeñas	Sur	20,93	32,81	35,99
Medianas	Sur	24,39	37,40	36,88
Grandes	Sur	29,55	39,75	40,70

Nota. Elaborado con base en resultados experimentales del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

El análisis comparativo muestra que las semillas del norte incrementan progresivamente su peso promedio desde 12,82 g en la categoría pequeña hasta 22,91 g en la categoría grande. De manera paralela, la longitud promedio aumenta de 31,34 a 39,01 mm y el diámetro de 29,61 a 39,10 mm. Este comportamiento evidencia una diferenciación morfométrica consistente entre las tres categorías de tamaño consideradas.

En las procedencias del sur se observa el mismo patrón creciente, aunque con valores promedio superiores. Las semillas pequeñas alcanzan 20,93 g de peso, 32,81 mm de longitud y 35,99 mm de diámetro; las medianas registran 24,39 g, 37,40 mm y 36,88 mm, respectivamente; mientras que las grandes presentan los mayores valores, con 29,55 g de peso, 39,75 mm de longitud y 40,70 mm de diámetro. En comparación con el norte, las semillas del sur muestran mayor peso y diámetro dentro de las tres categorías evaluadas, mientras que las diferencias en longitud son menos pronunciadas, especialmente entre las semillas grandes.

La comparación regional evidencia que las diferencias más marcadas se presentan en el peso y el diámetro. En la categoría pequeña, las semillas del sur superan a las del norte en 8,11 g de peso promedio y 6,38 mm de diámetro. En las semillas medianas, la diferencia alcanza 7,69 g en peso y 3,42 mm en diámetro; mientras que, en la categoría grande, las semillas del sur presentan 6,64 g más de peso y 1,60 mm más de diámetro. En cambio, la longitud de las semillas grandes es semejante entre regiones, con 39,01 mm en el norte y 39,75 mm en el sur. Estos resultados sugieren que la diferenciación regional se expresa principalmente en la masa y el grosor de las semillas, más que en su longitud.

Aunque las diferencias entre regiones son evidentes en las categorías pequeñas y medianas, las semillas grandes de ambas regiones presentan dimensiones próximas a 40 mm de longitud y diámetro. Esta similitud describe una convergencia morfométrica en las muestras evaluadas, pero no permite inferir por sí sola la existencia de un límite morfológico fisiológicamente determinado para la especie.

La variabilidad morfométrica observada entre regiones puede estar asociada con múltiples factores, entre ellos la procedencia, las condiciones ambientales durante el desarrollo del fruto, el estado fisiológico de los árboles madre y el manejo de la cosecha. Con los datos disponibles no es posible atribuir esta variación a una estrategia adaptativa específica ni inferir diferencias en la diversidad genética entre regiones.

Estas diferencias poseen implicaciones prácticas para la producción de plantas, porque el tamaño y la masa de las semillas pueden relacionarse con la disponibilidad inicial de reservas. Sin embargo, la selección de material reproductivo para conservación o restauración no debe basarse exclusivamente en estos atributos físicos, sino integrar procedencia, representatividad genética, calidad fisiológica y estado sanitario.

En consecuencia, la selección de procedencias no debe fundamentarse únicamente en el tamaño de las semillas. Mientras las semillas grandes ofrecen ventajas durante las primeras etapas del establecimiento, la conservación de la variabilidad genética continúa siendo un criterio prioritario para asegurar la capacidad adaptativa de las poblaciones frente a escenarios futuros de cambio climático y transformación del paisaje.

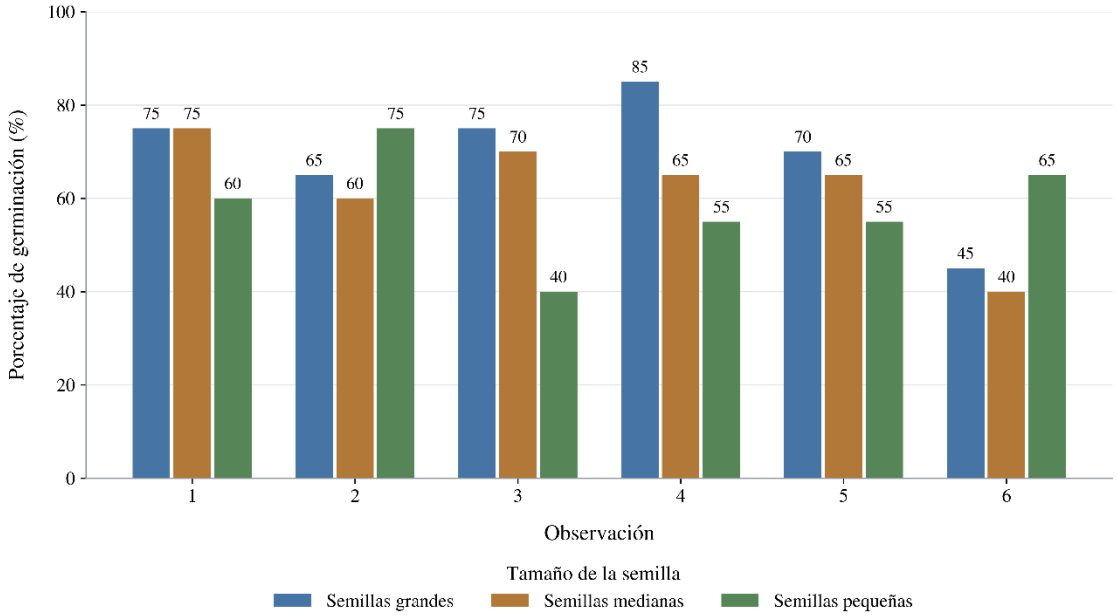
7.3.5. Influencia del tamaño de la semilla sobre la germinación

La relación entre el tamaño de la semilla y la capacidad germinativa constituye uno de los aspectos más estudiados en la biología de semillas de especies forestales. En términos generales, las semillas de mayor tamaño presentan ventajas fisiológicas asociadas a una mayor disponibilidad de reservas de carbohidratos, proteínas y lípidos, las cuales suministran la energía necesaria durante las primeras fases del desarrollo embrionario antes del establecimiento de la fotosíntesis (Baskin & Baskin, 2014; Bewley et al., 2013). En consecuencia, el tamaño de la semilla suele considerarse un indicador indirecto del vigor inicial, aunque su efecto depende también de la calidad fisiológica, genética y sanitaria del material de propagación.

Con el propósito de evaluar esta relación en *J. neotropica*, durante tres años consecutivos se realizaron ensayos de germinación en el vivero Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, utilizando semillas clasificadas en tres categorías de tamaño (pequeñas, medianas y grandes). Los porcentajes de germinación obtenidos en seis repeticiones se presentan en la Figura 7.6.

Figura 7.6

Porcentaje de germinación según el tamaño de la semilla de Juglans neotropica



Nota. Elaborado por los autores con base en resultados experimentales del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Los resultados evidencian una relación positiva entre el tamaño de la semilla y el porcentaje promedio de germinación. Las semillas grandes alcanzaron el mayor promedio (69,16 %), seguidas por las semillas medianas (62,50 %) y las pequeñas (58,33 %). Aunque todas las categorías presentaron variabilidad entre repeticiones, la tendencia general fue consistente, indicando que el incremento del tamaño de la semilla se asocia con una mayor probabilidad de germinación.

Desde el punto de vista fisiológico, este comportamiento puede explicarse por la mayor cantidad de reservas acumuladas en las semillas grandes. Los cotiledones contienen mayores concentraciones de sustancias de reserva que sostienen la respiración, la elongación celular y el crecimiento inicial del embrión durante la germinación, permitiendo que la plántula complete con mayor éxito las etapas previas al establecimiento autotrófico. Adicionalmente, las semillas de mayor tamaño suelen albergar embriones mejor desarrollados y presentan una mayor tolerancia frente a fluctuaciones ambientales como déficit hídrico temporal o variaciones de temperatura (Bewley et al., 2013; Harper, 1977).

La variabilidad observada entre repeticiones, particularmente en las semillas grandes, sugiere que la germinación no depende exclusivamente del tamaño. Factores como el estado fisiológico de las semillas, las condiciones ambientales durante el ensayo, la procedencia geográfica y la calidad sanitaria del lote también influyen significativamente sobre la expresión del potencial germinativo. Por ello, el tamaño debe interpretarse como un atributo que incrementa la probabilidad de éxito, pero no como un predictor absoluto de la germinación.

Desde la perspectiva silvicultural, estos resultados respaldan la utilización preferente de semillas medianas y grandes para la producción de plantas destinadas a programas de restauración ecológica y establecimiento de plantaciones, especialmente cuando se busca maximizar la emergencia y reducir pérdidas durante la fase de viverización. Sin embargo, esta estrategia debe complementarse con criterios de selección genética y fisiológica que aseguren la conservación de la diversidad intraespecífica y la adaptación local de las futuras poblaciones.

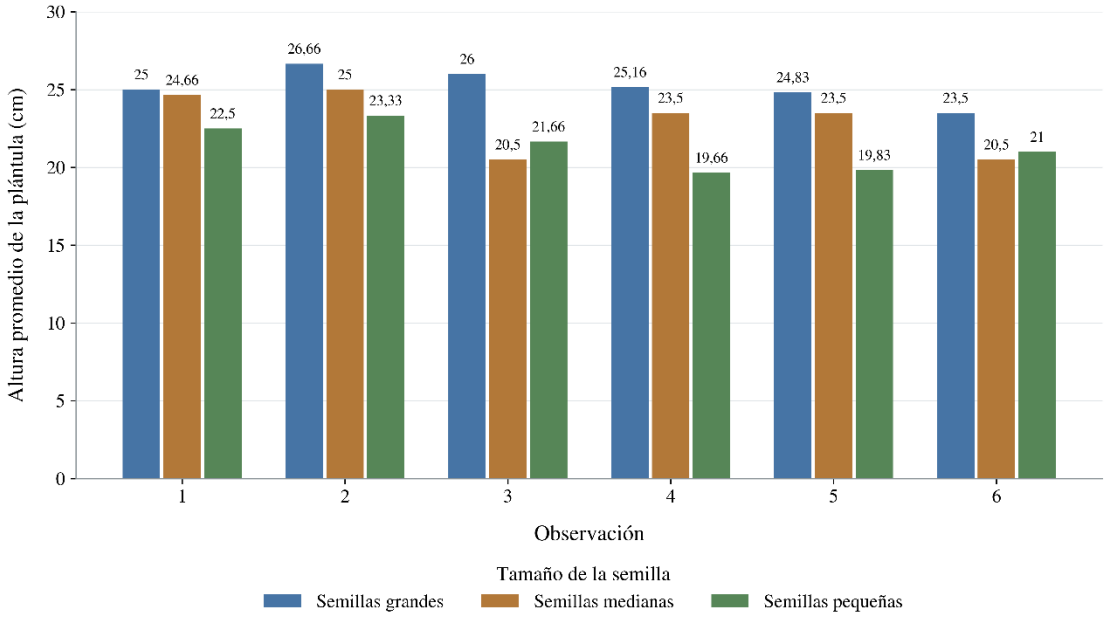
7.3.6. Influencia del tamaño de la semilla sobre el crecimiento inicial de las plántulas

Las ventajas asociadas al mayor tamaño de la semilla no se limitan al proceso de germinación. Diversos estudios han demostrado que la cantidad de reservas disponibles durante las primeras etapas del desarrollo influye directamente sobre el crecimiento inicial de las plántulas, particularmente antes de que el aparato fotosintético alcance su funcionamiento pleno (Leishman et al., 2000; Moles & Westoby, 2004). En consecuencia, las diferencias observadas durante la germinación pueden reflejarse posteriormente en el vigor y desarrollo de las plantas producidas en vivero.

Con el fin de evaluar esta relación, se registró la altura de plántulas originadas a partir de semillas de diferente tamaño durante los primeros 120 días de crecimiento en vivero. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7.7.

Figura 7.7

Relación entre el tamaño de la semilla y la altura de las plántulas de Juglans neotropica a los 120 días



Nota. Elaborado por los autores con base en resultados experimentales del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Los resultados muestran que las plántulas provenientes de semillas grandes alcanzaron consistentemente las mayores alturas, superando los 25 cm a los 120 días de evaluación. Las plántulas originadas de semillas medianas presentaron valores intermedios, cercanos a 23–24 cm, mientras que aquellas provenientes de semillas pequeñas registraron los menores crecimientos, con alturas promedio entre 20 y 22 cm.

La superioridad de las semillas grandes puede atribuirse a la mayor disponibilidad de reservas energéticas durante las primeras fases del crecimiento, permitiendo un desarrollo más rápido del sistema radical y de la parte aérea antes de que la plántula dependa exclusivamente de la fotosíntesis. Este comportamiento coincide con lo reportado para numerosas especies forestales tropicales y subtropicales, donde las semillas grandes producen plántulas más vigorosas y con mayores probabilidades de supervivencia durante el establecimiento inicial (Khurana & Singh, 2001; Souza & Válio, 2001).

Desde el punto de vista operativo, estos resultados tienen implicaciones directas para los viveros forestales. La clasificación de semillas por tamaño constituye una práctica sencilla y de bajo costo que permite incrementar la uniformidad de las plántulas y optimizar los programas de producción. No obstante, la selección exclusiva de semillas grandes podría reducir la representatividad genética del material utilizado. En consecuencia, la elección de semillas debe equilibrar el objetivo de obtener plántulas

vigorosas con la necesidad de conservar la diversidad genética de las poblaciones naturales, particularmente en programas de restauración ecológica.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el tamaño de la semilla influye positivamente tanto en la germinación como en el crecimiento inicial de las plántulas, confirmando que la calidad física constituye un componente determinante del desempeño temprano de *J. neotropica*. Sin embargo, estos atributos describen únicamente el potencial estructural de las semillas y no permiten establecer, por sí solos, si el embrión mantiene la viabilidad metabólica necesaria para completar exitosamente el proceso germinativo.

Los atributos físicos de la semilla constituyen la primera dimensión de su calidad biológica. Aunque la pureza, el contenido de humedad, el tamaño y las reservas nutricionales determinan en gran medida el potencial inicial de establecimiento, estos parámetros no garantizan por sí solos que la semilla sea funcionalmente viable. La capacidad real para originar plántulas normales y vigorosas depende también de procesos fisiológicos relacionados con la viabilidad del embrión, la integridad de las membranas celulares, la actividad metabólica y la expresión del potencial germinativo. En consecuencia, la caracterización integral de la calidad de las semillas requiere complementar la evaluación física con el análisis de la calidad fisiológica. En el siguiente apartado se examinan estos atributos mediante pruebas de viabilidad y germinación, estableciendo la relación entre las características físicas descritas previamente y el desempeño funcional observado durante la germinación y el desarrollo inicial de las plántulas.

Esta diferenciación entre calidad física y calidad fisiológica resulta particularmente importante en *J. neotropica*, debido a que la naturaleza recalcitrante de sus semillas hace que atributos como el contenido de humedad, la viabilidad metabólica y la capacidad germinativa estén estrechamente relacionados, pero no sean equivalentes.

7.4. Calidad fisiológica de las semillas de *J. neotropica*

La calidad fisiológica representa la capacidad funcional de una semilla para mantenerse metabólicamente activa, iniciar el proceso germinativo y originar una plántula normal bajo condiciones ambientales favorables. A diferencia de la calidad física, que describe atributos estructurales como la pureza, el contenido de humedad y el tamaño de las semillas, la calidad fisiológica evalúa el estado biológico del embrión y su capacidad para expresar el potencial germinativo.

En especies forestales, la calidad fisiológica constituye uno de los principales criterios para seleccionar material de propagación, ya que determina la eficiencia de los programas de viverización, restauración ecológica y conservación genética. En *J. neotropica*, la clasificación del comportamiento de las semillas durante el almacenamiento no ha sido uniforme en la literatura. Ceballos-Freire & López-Ríos (2007) las clasificaron como ortodoxas y evaluaron experimentalmente su conservación bajo diferentes temperaturas de almacenamiento; posteriormente, Toro Vanegas & Roldán Rojas (2018) las caracterizaron como recalcitrantes y recomendaron evitar su almacenamiento prolongado.

Más recientemente, Ramírez-López et al. (2025), a partir de semillas de tres procedencias del norte del Ecuador con contenidos de humedad entre 22,93 y 26,79 %, señalaron que la evidencia es compatible con un comportamiento recalcitrante, aunque plantearon la posibilidad de un comportamiento intermedio. Estas diferencias evidencian que la clasificación fisiológica de las semillas de *J. neotropica* aún requiere estudios específicos de tolerancia a la desecación y almacenamiento; no obstante, la evidencia reciente aconseja manejarlas con las precauciones propias de semillas sensibles a la pérdida de humedad.

La evaluación de la calidad fisiológica comprende diferentes parámetros que describen tanto la viabilidad del embrión como el comportamiento germinativo y el vigor inicial de las plántulas. Entre los indicadores más utilizados se encuentran la viabilidad, el porcentaje de germinación (PG), el índice de germinación (IG), el coeficiente de velocidad de germinación (CV), el tiempo promedio de germinación (T), el vigor germinativo (VG), el índice de velocidad de germinación (M) y la relación tallo:raíz, los cuales, en conjunto, permiten caracterizar el desempeño funcional de las semillas durante las primeras etapas del establecimiento.

Los resultados presentados en este capítulo integran información generada por el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) mediante estudios realizados entre 2023 y 2025 en diferentes procedencias de Ecuador. Esta integración permite comparar el comportamiento fisiológico de semillas recolectadas en distintos ecosistemas y sistemas de manejo, aportando una visión nacional sobre la calidad fisiológica de *J. neotropica*.

7.4.1. Viabilidad de las semillas

La viabilidad corresponde a la capacidad de una semilla para mantener tejidos embrionarios vivos y metabólicamente activos, independientemente de que la germinación llegue o no a expresarse posteriormente. En tecnología de semillas, la evaluación de la viabilidad constituye uno de los primeros pasos para estimar el potencial biológico de un lote, permitiendo identificar semillas fisiológicamente activas antes de realizar ensayos de germinación.

Es importante diferenciar la **viabilidad** del **porcentaje de germinación**, ya que ambos parámetros describen procesos biológicos distintos. Mientras la viabilidad determina si el embrión permanece vivo mediante la evaluación de su actividad metabólica, la germinación mide la capacidad de la semilla para completar exitosamente todo el proceso germinativo y producir una plántula normal. En consecuencia, una semilla puede resultar viable desde el punto de vista fisiológico y, sin embargo, no germinar debido a deterioro parcial, daños mecánicos, infecciones latentes, condiciones ambientales desfavorables o limitaciones propias del proceso germinativo.

En *J. neotropica*, esta diferenciación adquiere especial importancia debido al carácter recalcitrante de sus semillas. La elevada humedad interna mantiene activos los procesos metabólicos inmediatamente después de la dispersión, pero también favorece un deterioro fisiológico acelerado cuando las semillas permanecen almacenadas durante períodos prolongados. Por ello, la interpretación conjunta de la viabilidad y de la germinación proporciona una evaluación mucho más completa de la calidad fisiológica que cualquiera de estos parámetros analizados de forma independiente.

7.4.1.1. Evaluación mediante la prueba de tetrazolio

La prueba bioquímica de tetrazolio constituye uno de los métodos más utilizados para estimar rápidamente la viabilidad de las semillas. Su fundamento se basa en la reducción del cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio por las enzimas deshidrogenasas presentes en las células vivas del embrión. Como resultado de esta reacción, los tejidos fisiológicamente activos adquieren una coloración rojo carmín, mientras que los tejidos muertos o severamente deteriorados permanecen incoloros. De esta manera, la prueba permite determinar el estado metabólico del embrión sin esperar el desarrollo completo de la germinación.

En septiembre de 2026, el Programa de Investigación *Juglans* de la Universidad Técnica del Norte realizó una evaluación experimental de la viabilidad de semillas de *J. neotropica* recolectadas en el campus Yuyucocha, Ibarra, provincia de Imbabura. A partir de 500 unidades recolectadas se seleccionaron 400 que no presentaban daños externos, aperturas del endocarpio ni restos de mesocarpio. Las semillas seleccionadas se distribuyeron en cuatro lotes de 100 unidades y se mantuvieron en inmersión en agua durante 72 horas antes de la aplicación de la prueba.

Para la tinción se utilizó una solución acuosa de cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio al 1 %, preparada mediante la disolución de 1 g del reactivo y el ajuste del volumen final a 100 mL con agua destilada. El material se mantuvo en contacto con la solución durante seis horas, en oscuridad y a 30 °C. Se evaluaron dos formas de preparación: en la primera se retiró el endocarpio y se expusieron los tejidos de la semilla; en la segunda, las unidades se seccionaron por la mitad conservando el endocarpio adherido.

En la primera modalidad, la proporción de porciones cotiledonares que desarrollaron coloración rojiza o rosada fue de 63,5 %, 96,5 %, 95,5 % y 96,0 % en los cuatro lotes, respectivamente, con un promedio general de 87,9 %. En la segunda modalidad se evaluó una submuestra de 40 semillas, distribuida en cuatro grupos de 10, y se obtuvieron valores de 80 %, 90 %, 90 % y 100 %, equivalentes a un promedio general de 90 %. La proximidad entre los promedios obtenidos mediante ambas formas de preparación indica que las dos permitieron observar actividad metabólica en los tejidos; no obstante, el diferente número de unidades y la distinta forma de evaluación impiden considerarlas metodologías directamente comparables o establecer todavía cuál es la más adecuada.

Estos resultados constituyen la primera evaluación experimental documentada por el Programa de Investigación *Juglans* sobre la aplicación del tetrazolio en semillas de *J. neotropica* procedentes de Yuyucocha. Sin embargo, su interpretación debe considerarse preliminar hasta estandarizar la preparación de las semillas, definir los patrones topográficos de tinción del eje embrionario y los cotiledones y contrastar los resultados con una prueba de germinación realizada sobre el mismo lote. Las principales etapas de preparación, incubación y evaluación visual de los tejidos se presentan en la Figura 7.8.

Figura 7.8

Preparación y respuesta de las semillas de Juglans neotropica en la prueba de tetrazolio

Nota. **A)** Semillas seleccionadas para la evaluación. **B)** Semillas extraídas del endocarpio y distribuidas en cajas de Petri. **C)** Cajas de Petri con el material sumergido en una solución de cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio al 1 % y colocadas en la estufa. **D)** Incubación a 30 °C durante seis horas. **E)** Respuesta de tinción en semillas extraídas del endocarpio. **F)** Contraste entre tejidos con coloración rojiza y tejidos que permanecieron sin tinción. La coloración roja evidencia actividad de las enzimas deshidrogenasas en tejidos metabólicamente activos; la determinación de la viabilidad requiere considerar la intensidad, uniformidad y localización de la tinción en los tejidos esenciales del embrión. Ensayo realizado en los laboratorios del campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Imbabura, Ecuador, en septiembre de 2026.

Como antecedente nacional, Hurtado-Trejo et al. (2020), con base en los resultados de Herrera & Aguirre (2016), informaron una viabilidad de 13,25 % y una germinación de 3,75 % en semillas de *J. neotropica* procedentes del sur del Ecuador. La germinación se evaluó mediante cuatro repeticiones de 25 semillas, mantenidas a 22 °C y 65 % de humedad relativa. Aunque ambos porcentajes fueron bajos, la viabilidad determinada mediante el ensayo topográfico de tetrazolio superó en 9,5 puntos porcentuales a la germinación. Este antecedente demuestra que la presencia de tejidos metabólicamente activos no implica necesariamente que las semillas completen la germinación y produzcan plántulas normales.

Como antecedente regional, Ceballos-Freire & López-Ríos (2007) evaluaron mediante tetrazolio la viabilidad de semillas de *J. neotropica* procedentes de Manizales, Colombia, sometidas a almacenamiento durante seis meses a 4 °C, 12 °C y temperatura ambiente. La viabilidad inicial fue de 42 % y, al finalizar el período de almacenamiento, alcanzó 52 % a 4 °C, 34 % a 12 °C y 30 % a temperatura ambiente. Los autores señalaron que los resultados de viabilidad no coincidieron necesariamente con los obtenidos en las pruebas de germinación, diferencia que relacionaron con la dormancia de las semillas y las características de su cubierta.

La diferencia entre viabilidad y germinación documentada en el sur del Ecuador también coincide, en términos generales, con el antecedente colombiano. Sin embargo, en el ensayo realizado en Yuyucocha no se efectuó una prueba de germinación paralela con el mismo lote, por lo que no es posible establecer si esta discrepancia también se presentó en las semillas evaluadas en 2026. En conjunto, los antecedentes muestran que la actividad metabólica detectada mediante tetrazolio no garantiza necesariamente la germinación ni el establecimiento exitoso de una plántula. Mientras la prueba de tetrazolio identifica tejidos embrionarios fisiológicamente activos, la germinación depende además de la integridad de los tejidos, el estado de las reservas, el vigor de la semilla y las condiciones ambientales del proceso germinativo.

En consecuencia, la prueba de tetrazolio debe interpretarse como una estimación de la viabilidad fisiológica de un lote de semillas y analizarse conjuntamente con los ensayos de germinación y otros indicadores de vigor. Esta complementariedad resulta particularmente importante en *J. neotropica*, especie para la cual se han reportado diferencias entre viabilidad y germinación y cuyo comportamiento durante la desecación y el almacenamiento ha recibido distintas clasificaciones en la literatura. Por ello, la viabilidad determinada mediante tetrazolio no debe utilizarse de manera aislada para predecir el desempeño germinativo de las semillas en vivero.

7.4.1.2. Evaluación mediante el método de flotación

Como complemento a la prueba de tetrazolio, se evaluó la viabilidad de semillas procedentes de Yuyucocha (2025) mediante el método de flotación en agua. Esta técnica constituye una evaluación indirecta basada en la densidad de las semillas, bajo el supuesto de que aquellas con embriones completos y mayor contenido de reservas tienden a hundirse, mientras que semillas vacías, deterioradas o con tejidos parcialmente dañados presentan mayor flotabilidad.

El método de flotación registró una viabilidad promedio del 67 %, observándose diferencias entre categorías de tamaño: 80 % en semillas pequeñas, 70 % en semillas medianas y 77 % en semillas grandes. Aunque estos resultados muestran cierta correspondencia con la condición fisiológica de las semillas, deben interpretarse con cautela, ya que la flotación constituye un método indirecto que no evalúa la actividad metabólica del embrión. Factores como el contenido de humedad, la densidad de los tejidos o la presencia de cavidades internas pueden modificar el comportamiento de las semillas durante la inmersión, sin reflejar necesariamente su verdadera viabilidad.

Por esta razón, el método de flotación resulta útil como una herramienta rápida para la selección preliminar de semillas en vivero, pero no sustituye a la prueba de tetrazolio ni a los ensayos de germinación cuando se requiere una evaluación precisa de la calidad fisiológica.

7.4.2. Porcentaje de germinación (PG)

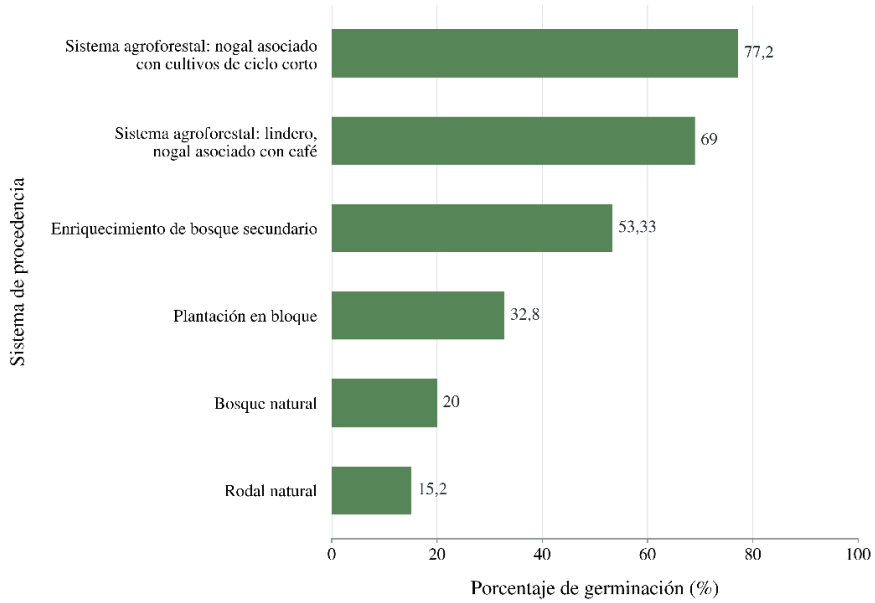
El porcentaje de germinación (PG) constituye el indicador más utilizado para evaluar la calidad fisiológica de las semillas, ya que expresa la proporción de semillas capaces de originar plántulas normales bajo condiciones controladas. A diferencia de la prueba de viabilidad mediante tetrazolio, que determina la actividad metabólica del embrión, el porcentaje de germinación integra todos los procesos fisiológicos necesarios para completar la emergencia de la plántula, incluyendo la movilización de reservas, el crecimiento del eje embrionario y la interacción con las condiciones ambientales del ensayo.

En consecuencia, el porcentaje de germinación representa la expresión funcional del potencial fisiológico de las semillas y constituye uno de los criterios más importantes para seleccionar material de propagación destinado a viverización, restauración ecológica y establecimiento de plantaciones forestales.

Con el propósito de evaluar la variabilidad fisiológica de *J. neotropica* en Ecuador, se integraron los resultados de seis investigaciones desarrolladas en las provincias de Imbabura, Loja y Napo, utilizando semillas recolectadas en diferentes ecosistemas y sistemas de manejo, sin aplicación de tratamientos pregerminativos ni empleo de sustratos especializados. Este enfoque permitió comparar el comportamiento germinativo de semillas de distintas procedencias y reconocer la variabilidad existente entre los materiales evaluados. Los porcentajes de germinación obtenidos para cada ecosistema y sistema de manejo se presentan en la Figura 7.9.

Figura 7.9

Porcentaje de germinación de semillas de Juglans neotropica según ecosistema y sistema de manejo



Nota. Elaborado por los autores con base en resultados experimentales del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Los resultados evidencian una marcada variación en el porcentaje de germinación entre las diferentes procedencias evaluadas, con valores comprendidos entre 15,2 % y 77,2 %. Esta amplitud evidencia diferencias importantes en la calidad fisiológica de los lotes evaluados, las cuales pueden estar asociadas con la procedencia y con las condiciones ecológicas, fisiológicas y de manejo bajo las cuales se formaron y recolectaron las semillas.

Los mayores porcentajes de germinación se registraron en los sistemas agroforestales de Natabuela (77,2 %) y Pimampiro (69,0 %), ambos ubicados en la provincia de Imbabura. Bajo las condiciones de los estudios analizados, estos lotes presentaron el mejor desempeño germinativo. No obstante, los datos no permiten atribuir causalmente esta respuesta al sistema agroforestal, porque también pueden intervenir la procedencia, el estado de madurez, las condiciones de los árboles madre, la cosecha y el manejo poscosecha.

En contraste, los menores porcentajes de germinación se observaron en Cuyuja (15,2 %) y en el bosque natural de El Tundo (20,0 %). Aunque estos resultados podrían interpretarse inicialmente como una menor calidad fisiológica, es importante considerar que las poblaciones naturales se desarrollan bajo condiciones ecológicas diferentes a las de los sistemas manejados. La elevada competencia por luz y nutrientes, la mayor humedad ambiental, la heterogeneidad microclimática y la posible incidencia de insectos

o microorganismos asociados a frutos y semillas pueden afectar el desarrollo de las semillas y su capacidad germinativa.

Las procedencias correspondientes a plantaciones y sistemas de enriquecimiento forestal presentaron valores intermedios de germinación. La plantación en bloque de Natabuela alcanzó 32,8 %, mientras que el enriquecimiento en bosque secundario de La Argelia registró 53,3 %. Estos resultados muestran diferencias entre los lotes procedentes de distintos sistemas de manejo; sin embargo, su interpretación debe considerar conjuntamente factores genéticos, fisiológicos, ambientales y de manejo poscosecha.

En conjunto, los resultados muestran diferencias de comportamiento fisiológico entre los sistemas y procedencias evaluados. En estas muestras, las semillas procedentes de sistemas agroforestales presentaron los mayores porcentajes de germinación, mientras que algunos lotes de bosques naturales registraron valores menores. Este patrón debe interpretarse dentro de las condiciones particulares de cada estudio y no como evidencia de que un tipo de sistema de manejo determine por sí solo la calidad fisiológica de las semillas.

Como antecedente regional, Ceballos-Freire & López-Ríos (2007) evaluaron en Colombia el efecto de diferentes condiciones de almacenamiento sobre la germinación de semillas de *J. neotropica*. Después de aplicar escarificación mecánica mediante despunte, las semillas presentaron inicialmente 44 % de germinación. A 4 °C, este valor se mantuvo en 38 % a los tres meses y 39 % a los seis meses, sin diferencias significativas en el porcentaje de germinación durante el período evaluado. En cambio, a 12 °C la germinación disminuyó a 29 % y 24 %, respectivamente, mientras que a temperatura ambiente descendió a 16 % después de tres meses y a 0 % a los seis meses. Estos resultados evidencian que, bajo las condiciones del estudio, la temperatura de almacenamiento influyó de manera importante en la conservación de la capacidad germinativa de las semillas. Debido a que el ensayo colombiano incluyó escarificación mecánica antes de la germinación, sus valores no son directamente comparables con los estudios ecuatorianos presentados en la Figura 7.8, realizados sin tratamientos pregerminativos.

Desde una perspectiva silvicultural, estos resultados tienen implicaciones relevantes para la selección y manejo de fuentes semilleras. Los sistemas agroforestales evaluados en Ecuador proporcionaron lotes con alta capacidad germinativa y podrían constituir fuentes importantes de semillas para la producción de plantas. Sin embargo, la selección de árboles semilleros no debe basarse exclusivamente en el porcentaje de germinación. Los programas de restauración y conservación deben equilibrar la calidad fisiológica con la representatividad genética de las poblaciones, incorporando material procedente de diferentes fuentes para preservar la diversidad adaptativa de la especie. Asimismo, los resultados obtenidos en Colombia muestran que las condiciones posteriores a la cosecha, particularmente la temperatura y el tiempo de almacenamiento, pueden modificar sustancialmente la capacidad germinativa.

Finalmente, la variabilidad observada entre procedencias y condiciones de conservación confirma que el porcentaje de germinación constituye únicamente uno de los componentes de la calidad fisiológica. Para comprender de manera más completa el comportamiento de las semillas es necesario incorporar otros indicadores relacionados

con la rapidez y uniformidad de la germinación, el vigor de las plántulas y la eficiencia del establecimiento inicial, aspectos que se analizan en el siguiente apartado mediante los principales índices fisiológicos empleados en tecnología de semillas.

7.4.3. Índices fisiológicos de germinación y vigor

Además del porcentaje de germinación, la calidad fisiológica de las semillas puede evaluarse mediante indicadores que describen la rapidez, uniformidad y vigor con que ocurre el proceso germinativo. Mientras el porcentaje de germinación cuantifica la proporción de semillas capaces de originar plántulas normales, los índices fisiológicos permiten comprender la dinámica temporal de la germinación y el desempeño inicial de las plántulas, proporcionando una evaluación más completa del potencial biológico del material de propagación.

Con este propósito se analizaron seis investigaciones desarrolladas entre 2023 y 2025 en las localidades de Yuyucocha, Natabuela, Chorlaví y Pimampiro (provincia de Imbabura). Los estudios incluyeron diferentes indicadores fisiológicos relacionados con la velocidad de germinación, el vigor de las plántulas y la eficiencia del establecimiento inicial, permitiendo comparar el comportamiento de distintos lotes de semillas recolectadas bajo diversas condiciones ambientales y de manejo (Tabla 7.3).

Tabla 7.3

Resumen de los principales indicadores de calidad fisiológica de semillas de Juglans neotropica evaluados en Imbabura (2023–2025)

Indicador	Significado fisiológico	Tendencia observada
Índice de germinación (IG)	Rapidez y cantidad de semillas germinadas.	Mayor en Pimampiro.
Coeficiente de velocidad de germinación (CV)	Velocidad del proceso germinativo.	Mayor en Yuyucocha 2024.
Tiempo promedio de germinación (T)	Días requeridos para germinar.	Disminuyó entre 2023 y 2024.
Vigor germinativo (VG)	Energía inicial de las plántulas.	Generalmente bajo.
Índice de velocidad de germinación (M)	Velocidad acumulada de emergencia.	Ligera mejora en 2024.

Nota. Elaborado con base en resultados experimentales del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

El índice de germinación (IG) mostró un comportamiento consistente con los resultados obtenidos para el porcentaje de germinación. Las semillas procedentes de Pimampiro alcanzaron el valor más alto (72,76), seguidas por los lotes de Yuyucocha (35,36 en 2024) y Natabuela (32,00), mientras que Chorlaví y Yuyucocha (2023) registraron los valores más bajos. Estos resultados indican que las semillas de Pimampiro no solamente germinaron en mayor proporción, sino también con mayor rapidez, característica que constituye una ventaja importante para la producción de plántulas en vivero.

El coeficiente de velocidad de germinación (CV) evidenció diferencias importantes entre procedencias y años de evaluación. Los mayores valores se registraron en Yuyucocha durante 2024 (1,56), contrastando con los obtenidos en 2023 (0,04), lo que refleja una mejora significativa en la velocidad de germinación del lote de semillas evaluado. Pimampiro presentó un comportamiento intermedio (0,96), mientras que Natabuela y Chorlaví registraron los valores más bajos. Esta variación demuestra que la rapidez con la que emergen las plántulas depende tanto de la calidad fisiológica del lote como de las condiciones de producción y conservación de las semillas.

El tiempo promedio de germinación (T) confirmó esta tendencia. En Yuyucocha, el tiempo requerido para completar la germinación disminuyó de 81,26 días en 2023 a 64,48 días en 2024, indicando una respuesta fisiológica más eficiente del lote evaluado. La reducción del tiempo de germinación constituye un atributo deseable en viverización, ya que permite obtener plántulas más uniformes, reducir el período de permanencia en germinadores y optimizar el manejo operativo del vivero.

Los indicadores relacionados con el vigor germinativo (VG) y el índice de velocidad de germinación (M) mostraron valores relativamente bajos en la mayoría de las procedencias analizadas. Aunque Yuyucocha presentó una ligera mejora entre 2023 y 2024, los resultados evidencian que las plántulas de *J. neotropica* poseen un establecimiento inicial relativamente lento, comportamiento que coincide con la estrategia ecológica característica de numerosas especies forestales de bosques montanos andinos. En estas especies, la inversión de recursos se orienta hacia la producción de plántulas robustas y longevas más que hacia una emergencia rápida, estrategia que favorece la supervivencia en ambientes con elevada competencia y condiciones ambientales variables.

Considerados de manera conjunta, los índices fisiológicos muestran que la calidad de las semillas no depende únicamente de la capacidad para germinar, sino también de la velocidad y uniformidad con que se desarrolla este proceso. Bajo las condiciones evaluadas, las semillas procedentes de Pimampiro presentaron el mejor desempeño fisiológico global, mientras que los lotes de Yuyucocha evidenciaron una mejora significativa entre 2023 y 2024, posiblemente asociada a diferencias en el estado de madurez de los frutos, el manejo de la cosecha o las condiciones de almacenamiento. En contraste, Chorlaví registró los valores más bajos para la mayoría de los indicadores, reflejando una menor expresión del potencial fisiológico.

Desde una perspectiva silvicultural, estos resultados confirman que la selección de fuentes semilleras debe fundamentarse en un conjunto de indicadores fisiológicos y no únicamente en el porcentaje de germinación. Un lote de semillas puede presentar una germinación aceptable, pero originar plántulas poco vigorosas o con una emergencia lenta y desuniforme, condiciones que incrementan los costos de producción y reducen la eficiencia de los programas de viverización. Por ello, la evaluación integrada de la rapidez de germinación, el vigor inicial y la uniformidad del establecimiento proporciona una herramienta más robusta para seleccionar el material de propagación destinado a programas de restauración ecológica y conservación genética.

7.4.4. Relación tallo:raíz en biomasa y longitud de plántulas de *J. neotropica*

La calidad fisiológica de las semillas no solamente se refleja en la capacidad de germinar, sino también en el desarrollo morfológico y funcional de las plántulas obtenidas en vivero. Entre los indicadores más utilizados para evaluar la calidad de planta se encuentra la relación tallo:raíz, la cual expresa el equilibrio entre la biomasa o longitud de la parte aérea y el sistema radical. Este parámetro constituye un criterio ampliamente empleado en silvicultura y restauración ecológica porque permite estimar la capacidad potencial de las plántulas para soportar el estrés hídrico y establecerse exitosamente después del trasplante.

Desde el punto de vista fisiológico, un sistema radical bien desarrollado incrementa la capacidad de absorción de agua y nutrientes, mientras que una parte aérea excesivamente grande en relación con la raíz aumenta la demanda hídrica y puede reducir la supervivencia durante las primeras etapas del establecimiento en campo. En consecuencia, una relación tallo:raíz equilibrada constituye un indicador de vigor y de calidad fisiológica de las plántulas (Gómez, 2010).

Con el propósito de evaluar este atributo en *J. neotropica*, se analizaron plántulas producidas en el vivero Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, determinándose la biomasa seca y la longitud del tallo y del sistema radical. A diferencia del formato tradicional de proporciones, las relaciones se expresan aquí mediante cocientes, facilitando su comparación con la literatura internacional. Los valores obtenidos para la biomasa y longitud del tallo y la raíz, así como sus respectivos cocientes tallo:raíz, se presentan en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4

Relación tallo:raíz en biomasa y longitud de plántulas de Juglans neotropica

Plántula	Biomasa tallo (g)	Biomasa raíz (g)	Cociente biomasa (T/R)	Longitud tallo (cm)	Longitud raíz (cm)	Cociente longitud (T/R)
1	20	32	**0,63**	63	71	**0,89**
2	14	18	**0,78**	58	37	**1,57**
3	19	10	**1,90**	58	32	**1,81**
4	18	8	**2,25**	64	30	**2,13**
5	5	2	**2,50**	24	23	**1,04**

Nota. Elaborado con base en resultados experimentales del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). T/R = relación tallo:raíz.

El análisis de la biomasa evidenció variación entre las plántulas evaluadas. Los cocientes tallo:raíz oscilaron entre **0,63 y 2,50**, indicando diferentes patrones de asignación de biomasa entre la parte aérea y el sistema radical. La plántula 1 presentó el cociente más bajo (0,63), lo que indica una mayor asignación relativa de biomasa al sistema radical que a la parte aérea. Esta característica puede resultar favorable para la absorción de agua y nutrientes después del trasplante; sin embargo, el valor observado no debe interpretarse por sí solo como una condición óptima, en ausencia de rangos de referencia específicos para *J. neotropica*.

En contraste, las plántulas 3, 4 y 5 presentaron cocientes superiores a la unidad (1,90; 2,25 y 2,50, respectivamente), lo que evidencia una mayor asignación relativa de biomasa a la parte aérea. Una relación tallo:raíz elevada puede representar una condición menos favorable frente al déficit hídrico, debido a una mayor demanda de agua de la parte aérea en relación con la biomasa radical disponible. No obstante, la respuesta de las plántulas después del trasplante depende también de otros atributos morfológicos y fisiológicos, así como de las condiciones ambientales y de manejo durante el establecimiento.

La relación basada en la longitud presentó cocientes entre **0,89 y 2,13**. La comparación con los cocientes de biomasa muestra que la longitud del tallo y de la raíz no necesariamente refleja la distribución relativa de biomasa entre ambos componentes. Por ejemplo, plántulas con relaciones de longitud relativamente próximas pueden presentar diferencias importantes en la asignación de biomasa. Por ello, ambos indicadores aportan información complementaria para caracterizar la morfología y calidad de las plántulas.

Desde una perspectiva silvicultural, estos resultados resaltan la utilidad de incorporar la biomasa, además de las dimensiones longitudinales, en la evaluación de la calidad de las plántulas. Una mayor asignación relativa de biomasa al sistema radical puede favorecer la capacidad de absorción de agua y nutrientes y contribuir al establecimiento de las plantas, particularmente bajo condiciones de disponibilidad hídrica limitada. Sin embargo, la relación tallo:raíz debe interpretarse conjuntamente con otros atributos de calidad y no como un indicador aislado del desempeño futuro en campo.

En el conjunto evaluado, la plántula 1 presentó la **mayor asignación relativa de biomasa al sistema radical**, mientras que las plántulas 4 y 5 mostraron los cocientes tallo:raíz de biomasa más elevados. Estos resultados corresponden a una evaluación experimental en vivero y deben interpretarse como una caracterización de la distribución de biomasa de las plántulas, más que como predictores absolutos de su desempeño posterior. La comprobación de su relación con la supervivencia y el crecimiento requiere evaluaciones posteriores al establecimiento en campo.

La incorporación de la relación tallo:raíz complementa la evaluación del proceso de producción de material vegetal, al permitir caracterizar atributos de las plántulas obtenidas después de la germinación. De esta manera, la evaluación abarca diferentes etapas del proceso regenerativo, desde la capacidad germinativa de las semillas hasta el desarrollo morfológico y funcional de las plantas producidas en vivero.

7.4.5. Técnicas avanzadas para la evaluación de la calidad fisiológica de las semillas

La evaluación de la calidad fisiológica de las semillas ha evolucionado significativamente durante las últimas décadas gracias al desarrollo de técnicas de diagnóstico no destructivas que permiten analizar la estructura interna y el estado fisiológico de las semillas con mayor precisión que los métodos convencionales. Estas herramientas complementan, mas no sustituyen, las pruebas tradicionales de viabilidad y germinación, proporcionando información detallada sobre la organización interna del embrión, la distribución de tejidos de reserva y el grado de deterioro fisiológico antes de la siembra.

Entre las tecnologías con mayor potencial destacan la radiografía digital, la tomografía computarizada (TC) y la resonancia magnética (RM), metodologías que han demostrado alta eficiencia en la evaluación de semillas de diversas especies forestales, incluyendo representantes del género *Juglans*. Estas técnicas permiten identificar semillas vacías, embriones incompletos, cavidades internas, daños mecánicos y alteraciones anatómicas que difícilmente pueden detectarse mediante observaciones externas. Asimismo, ofrecen la posibilidad de evaluar grandes lotes de semillas sin destruir el material, aspecto de particular importancia cuando se trabaja con especies amenazadas o con disponibilidad limitada de germoplasma.

La radiografía digital constituye actualmente una de las herramientas más utilizadas para la evaluación rápida de semillas forestales. Su aplicación permite visualizar la conformación del embrión y de los tejidos de reserva, facilitando la identificación de semillas vacías, malformadas o afectadas por insectos. Debido a su rapidez y bajo costo relativo, esta técnica ha sido incorporada progresivamente en programas de certificación de semillas y bancos de germoplasma.

La tomografía computarizada representa un avance adicional al permitir la obtención de reconstrucciones tridimensionales de alta resolución. A diferencia de la radiografía convencional, la tomografía genera cortes sucesivos de la semilla, posibilitando el análisis detallado de la arquitectura interna del embrión y de los tejidos de almacenamiento. Esta información resulta especialmente útil para estudiar alteraciones anatómicas asociadas al deterioro fisiológico, daños mecánicos o defectos de desarrollo, sin afectar la viabilidad del material analizado.

Por su parte, la resonancia magnética permite evaluar la distribución del agua y de los compuestos de reserva mediante la detección de protones de hidrógeno presentes en los tejidos. Debido a que el contenido de agua cambia durante el proceso germinativo, esta técnica ofrece información sobre el estado fisiológico de la semilla y sobre la dinámica de hidratación del embrión, aspectos particularmente relevantes en especies con semillas recalcitrantes como *J. neotropica*. En estas especies, donde el mantenimiento de la humedad es determinante para conservar la viabilidad, la resonancia magnética constituye una herramienta con gran potencial para investigar los procesos fisiológicos asociados al deterioro y a la pérdida de capacidad germinativa.

Aunque estas metodologías todavía presentan limitaciones relacionadas con el costo del equipamiento y la disponibilidad de laboratorios especializados, representan una perspectiva prometedora para la investigación forestal. Su incorporación progresiva permitirá complementar los métodos tradicionales empleados en la evaluación de semillas y generar diagnósticos más precisos sobre la calidad fisiológica del germoplasma destinado a programas de conservación, restauración ecológica y mejoramiento genético.

En Ecuador, la evaluación de la calidad fisiológica de *J. neotropica* continúa fundamentándose principalmente en pruebas de tetrazolio, ensayos de germinación e indicadores de vigor. Sin embargo, la incorporación futura de técnicas de imagen de alta resolución permitiría profundizar el conocimiento sobre la biología de las semillas, optimizar la selección de fuentes semilleras y fortalecer los programas nacionales de conservación y propagación de esta especie.

Los resultados presentados en este apartado demuestran que la calidad fisiológica depende de la interacción entre la viabilidad del embrión, la capacidad germinativa y el vigor inicial de las plántulas. No obstante, incluso cuando estos atributos son favorables, el establecimiento exitoso puede verse comprometido por la presencia de microorganismos asociados a frutos y semillas. Hongos, bacterias y otros agentes fitopatógenos pueden reducir la viabilidad, alterar el proceso germinativo o afectar el desarrollo inicial de las plántulas, disminuyendo la eficiencia de los programas de propagación forestal.

En consecuencia, la evaluación integral de la calidad de las semillas requiere incorporar un cuarto componente: la **calidad sanitaria**, entendida como el estado fitosanitario del material de propagación y la ausencia de organismos capaces de afectar su desempeño fisiológico. La integración de la calidad genética, física, fisiológica y sanitaria proporciona una visión completa del potencial biológico de las semillas de *J. neotropica* y constituye el fundamento para el establecimiento de programas eficientes de conservación, restauración y producción de plantas.

7.5. Calidad sanitaria de frutos y semillas de *J. neotropica*

La calidad sanitaria constituye el cuarto componente de la calidad integral de las semillas y complementa la evaluación genética, física y fisiológica desarrollada en los apartados anteriores. Mientras la calidad genética determina el potencial hereditario de las semillas, la calidad física describe sus atributos estructurales y la calidad fisiológica evalúa su funcionamiento biológico, la calidad sanitaria analiza la influencia de los organismos asociados y de las condiciones ambientales sobre la conservación de ese potencial. Este componente resulta fundamental para garantizar la producción de plantas sanas y vigorosas, reducir las pérdidas durante la propagación y prevenir la diseminación de organismos que puedan afectar los programas de restauración ecológica y establecimiento de plantaciones.

A continuación, se describen los principales agentes de deterioro sanitario asociados a frutos y semillas de *J. neotropica*, los factores que favorecen su desarrollo, los métodos utilizados para evaluar su estado fitosanitario y los resultados obtenidos en las evaluaciones realizadas en el marco del Programa de Investigación *Juglans.*

7.5.1. Concepto e importancia de la calidad sanitaria

La calidad sanitaria se refiere al estado fitosanitario del material de propagación, determinado por la ausencia o presencia de organismos capaces de afectar su viabilidad, germinación, vigor y establecimiento en vivero o en campo. En especies forestales de semillas recalcitrantes, como *J. neotropica*, este componente adquiere una importancia particular debido al elevado contenido de humedad de los frutos y semillas, condición que favorece el desarrollo de microorganismos y acelera los procesos de deterioro durante la maduración, la cosecha y el almacenamiento. Como consecuencia, la presencia de insectos, hongos u otros organismos puede reducir significativamente la viabilidad de las semillas y afectar la producción de plántulas destinadas a programas de restauración ecológica, conservación genética y establecimiento de plantaciones.

En Ecuador, la sanidad de los frutos y semillas de *J. neotropica* puede verse comprometida por la acción simultánea de insectos, microorganismos y prácticas inadecuadas de manejo poscosecha. El deterioro suele iniciarse cuando los frutos aún permanecen en el árbol, continúa durante la maduración y puede intensificarse durante el almacenamiento cuando las condiciones ambientales favorecen la colonización por organismos oportunistas.

En consecuencia, la calidad sanitaria constituye un complemento indispensable de la calidad fisiológica, ya que la presencia de agentes bióticos y las condiciones inadecuadas de manejo pueden reducir la viabilidad, disminuir la capacidad germinativa y afectar el vigor de las plántulas, aun cuando las semillas conserven inicialmente una adecuada calidad genética y física. Por ello, la evaluación sanitaria debe formar parte de los programas de producción de semillas forestales, permitiendo identificar oportunamente los factores de riesgo y establecer medidas preventivas que garanticen la obtención de material de propagación de alta calidad.

7.5.2. Principales agentes de deterioro sanitario

El deterioro sanitario de los frutos y semillas de *J. neotropica* responde a la interacción de diferentes organismos que afectan tanto los tejidos externos del fruto como el embrión y las reservas contenidas en el endocarpio. Estos agentes incluyen insectos perforadores, hongos fitopatógenos y microorganismos saprófitos de almacenamiento, cuya incidencia depende de factores ambientales, del estado de madurez del fruto y del manejo realizado durante la cosecha y la poscosecha.

7.5.2.1. Insectos asociados al deterioro de frutos y semillas

Entre los principales agentes entomológicos descritos para el género *Juglans* se encuentran las moscas de la fruta (*Anastrepha* spp.) y las polillas de la nuez (*Cydia* spp.), insectos que ocasionan daños durante el desarrollo del fruto al alimentarse de los tejidos o depositar sus huevos en el interior del pericarpio. En Ecuador, *J. neotropica* ha sido reportada como hospedera de *Anastrepha fraterculus*, especie cuya oviposición puede favorecer procesos de pudrición, caída prematura del fruto y disminución de la calidad de las semillas (Aluja & Mangan, 2008; Norrbom et al., 1999).

Asimismo, diversos coleópteros perforadores, particularmente especies de las familias Curculionidae y Bostrichidae, pueden excavar galerías en el endocarpio y consumir parcial o totalmente el embrión y los tejidos de reserva. Este tipo de daño reduce la viabilidad de las semillas y facilita la entrada de microorganismos oportunistas, acelerando los procesos de deterioro durante el almacenamiento (Baskin & Baskin, 2014; Schmidt, 2000).

Más allá del daño directo ocasionado por estos insectos, las perforaciones generadas en el fruto constituyen puertas de entrada para microorganismos asociados al proceso de descomposición, favoreciendo la colonización secundaria de los tejidos y reduciendo progresivamente la calidad fisiológica del material de propagación.

7.5.2.2. Microorganismos asociados al deterioro sanitario

Los frutos de *J. neotropica* presentan una elevada susceptibilidad a la colonización por microorganismos, particularmente cuando permanecen expuestos a condiciones de alta humedad durante la maduración o el almacenamiento. La literatura especializada ha documentado que diversas especies de hongos pueden afectar los tejidos externos del fruto, degradar el endocarpio o colonizar el embrión, provocando pérdidas importantes en la calidad de las semillas.

Entre los microorganismos más frecuentemente reportados se encuentran especies de los géneros *Colletotrichum*, asociadas a síntomas de antracnosis y necrosis del pericarpio; *Botryosphaeria* y *Phytophthora*, relacionadas con procesos de pudrición en ambientes húmedos; *Fusarium*, vinculado a necrosis del embrión y reducción del porcentaje de germinación; y hongos de almacenamiento pertenecientes a los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*, capaces de colonizar frutos almacenados bajo condiciones inadecuadas y degradar los tejidos de reserva (Gordillo et al., 2020; Neergaard, 1977).

Es importante señalar que la mayoría de estos microorganismos actúan de manera oportunista, aprovechando heridas mecánicas, perforaciones ocasionadas por insectos o condiciones ambientales favorables para establecerse sobre los frutos y semillas. En consecuencia, el deterioro sanitario generalmente responde a la interacción entre múltiples factores y no a la acción aislada de un único organismo.

7.5.3. Factores predisponentes al deterioro sanitario

La incidencia de insectos y microorganismos asociados a frutos y semillas de *J. neotropica* depende no solamente de la presencia de los organismos causales, sino también de un conjunto de factores ambientales y de manejo que favorecen su establecimiento y desarrollo. En la mayoría de los casos, el deterioro sanitario resulta de la interacción entre las condiciones del sitio, el estado fisiológico de los frutos y las prácticas aplicadas durante la cosecha, el transporte y el almacenamiento.

Uno de los factores más importantes es la humedad. Debido a que *J. neotropica* produce semillas recalcitrantes con elevado contenido de agua, los frutos permanecen fisiológicamente activos después de la cosecha y constituyen un sustrato favorable para la colonización por microorganismos oportunistas cuando el almacenamiento se realiza en ambientes con escasa ventilación o humedad relativa elevada. Estas condiciones aceleran la descomposición del pericarpio, favorecen el crecimiento superficial de hongos y reducen progresivamente la viabilidad del embrión.

El retraso en la recolección representa otro factor de riesgo importante. Los frutos que permanecen excesivo tiempo en el árbol o sobre el suelo incrementan su exposición a insectos perforadores, microorganismos saprófitos y fluctuaciones ambientales que deterioran gradualmente la calidad sanitaria y fisiológica de las semillas. De igual manera, los daños mecánicos producidos durante la cosecha, el despulpado o el transporte generan heridas que facilitan la penetración de microorganismos y aceleran los procesos de descomposición.

Las condiciones de almacenamiento también ejercen una influencia determinante sobre la conservación sanitaria de las semillas. La acumulación de humedad, la escasa circulación de aire y las temperaturas elevadas favorecen el desarrollo de hongos oportunistas y la degradación progresiva de los tejidos de reserva. Por ello, la cosecha oportuna, la manipulación cuidadosa y el almacenamiento bajo condiciones controladas constituyen medidas esenciales para preservar la calidad sanitaria del material de propagación y reducir las pérdidas durante la producción de plantas.

En conjunto, estos factores demuestran que la calidad sanitaria no depende exclusivamente de la presencia de organismos patógenos, sino de la interacción entre las características biológicas de la especie y las condiciones ambientales y de manejo a las que son sometidos los frutos y semillas desde la cosecha hasta la siembra.

7.5.4. Evaluación de la calidad sanitaria

La evaluación sanitaria tiene como finalidad determinar el estado fitosanitario de los frutos y semillas mediante la identificación de signos, síntomas y daños ocasionados por insectos, microorganismos y factores de deterioro asociados al manejo poscosecha. Esta evaluación constituye un componente esencial de la tecnología de semillas, ya que permite estimar el riesgo potencial de pérdida de viabilidad, disminución del vigor y transmisión de organismos asociados al material de propagación.

En programas de producción de plantas forestales, la evaluación sanitaria debe realizarse de manera secuencial durante las diferentes etapas del proceso, incluyendo la inspección de los árboles semilleros, la cosecha, el beneficio de los frutos, el almacenamiento y la germinación en vivero. La integración de estas observaciones permite detectar oportunamente problemas sanitarios y establecer medidas preventivas antes de que el deterioro afecte la calidad fisiológica de las semillas.

En *J. neotropica*, la evaluación sanitaria comprende la inspección visual de los frutos, el examen externo e interno de las semillas, la detección de daños ocasionados por insectos perforadores y la observación de síntomas compatibles con procesos de colonización microbiana. Cuando se requiere una identificación taxonómica del agente causal, estas observaciones deben complementarse con pruebas de laboratorio, como el aislamiento en medios de cultivo, la caracterización microscópica, ensayos de patogenicidad o técnicas moleculares, de acuerdo con los protocolos internacionales para análisis de semillas.

La Tabla 7.5 resume los principales componentes considerados en la evaluación sanitaria de semillas de *J. neotropica*, los aspectos que deben analizarse y los métodos comúnmente empleados para su determinación.

Tabla 7.5

Principales componentes de la evaluación sanitaria de semillas de Juglans neotropica

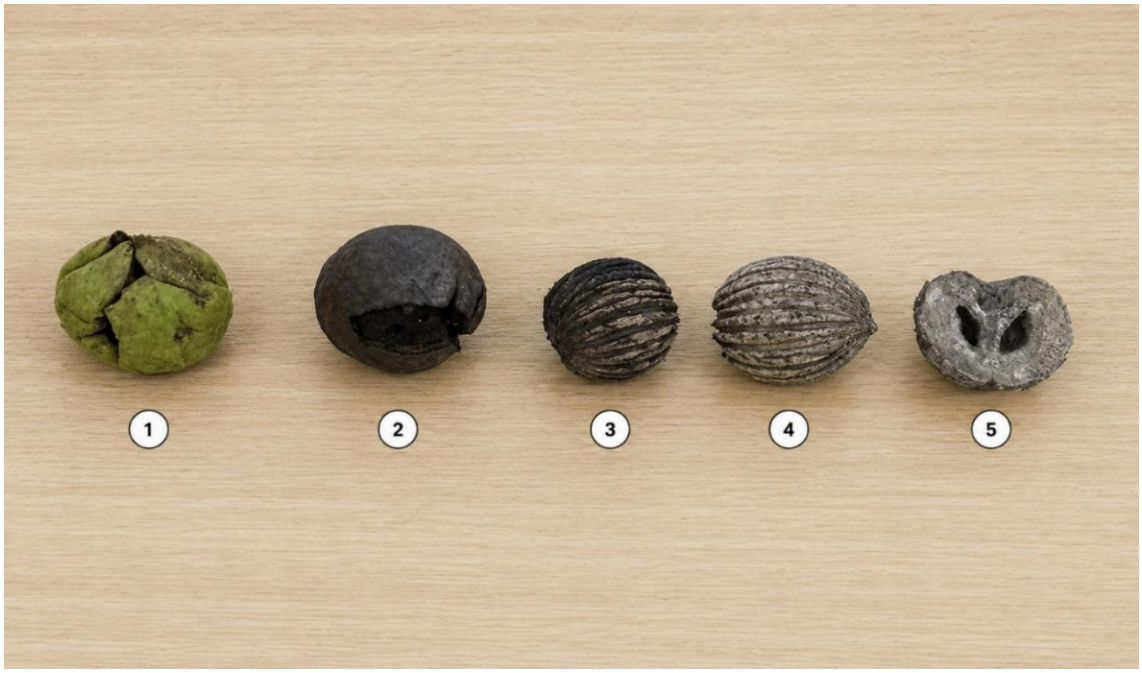
Categoría	Aspectos a evaluar	Métodos de análisis
Hongos fitopatógenos	Presencia de *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp., *Botryosphaeria* spp.	Prueba en papel secante, cultivo en PDA u otros medios selectivos, técnicas moleculares.
Bacterias fitopatógenas	Contaminación superficial y endófita (*Pseudomonas* spp., *Xanthomonas* spp.).	Aislamiento en medios diferenciales, pruebas moleculares.
Virus y viroides	Posible transmisión por semilla (poco frecuente en Juglandáceas).	Técnicas serológicas (ELISA) y moleculares (RT-PCR, qPCR).
Insectos y ácaros	Daños por perforadores o depredadores de semillas.	Inspección visual, lupa, rayos X, pruebas de flotación.
Daños visibles bióticos	Manchas, pudriciones, malformaciones, exudados.	Evaluación macroscópica y microscópica.
Medidas de desinfección	Eficacia de tratamientos pregerminativos (hipoclorito, agua caliente, fungicidas biológicos).	Ensayos de germinación y monitoreo en almacenamiento/vivero.
Niveles de infestación	Porcentaje de semillas infectadas o contaminadas.	Cálculo de incidencia y comparación con umbrales de tolerancia (ISTA, normas locales).

Nota. Adaptado de International Seed Testing Association (ISTA, 2025) y literatura especializada.

Como parte del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), se realizó una evaluación sanitaria de frutos y semillas de *J. neotropica* recolectados en diferentes localidades del Ecuador (Figura 7.10). La evaluación se fundamentó en el análisis macroscópico de los síntomas observados en frutos y semillas, complementado con la revisión de literatura especializada. En consecuencia, la identificación de los posibles agentes asociados al deterioro sanitario debe interpretarse como **presuntiva**, ya que no se realizaron aislamientos microbiológicos, pruebas de patogenicidad ni análisis moleculares que permitieran confirmar la identidad de los organismos involucrados. Por esta razón, las asociaciones descritas en este capítulo se expresan en términos de compatibilidad con los síntomas observados y no como identificaciones etiológicas confirmadas.

Figura 7.10

Estados sanitarios observados en frutos y semillas de Juglans neotropica durante la evaluación macroscópica realizada en el Programa de Investigación Juglans



Nota. La identificación de los posibles agentes asociados al deterioro sanitario se fundamenta en la sintomatología observable y en la literatura especializada. Las asignaciones taxonómicas corresponden a diagnósticos presuntivos y no constituyen una confirmación etiológica, debido a que no se realizaron aislamientos microbiológicos, pruebas de patogenicidad ni análisis moleculares.

7.5.5. Interpretación de los estados sanitarios observados en frutos y semillas

La Figura 7.10 presenta una secuencia representativa de los principales estados sanitarios observados en frutos y semillas de *J. neotropica* durante la evaluación macroscópica realizada en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). La progresión observada ilustra diferentes etapas del deterioro sanitario, desde frutos aparentemente sanos hasta semillas con pérdida total de su integridad estructural.

Las interpretaciones que siguen se basan en la sintomatología macroscópica y en su comparación con la literatura especializada; por tanto, los posibles agentes se mencionan únicamente como compatibles con los síntomas observados y no como identificaciones etiológicas confirmadas.

1. Fruto verde con síntomas iniciales de deterioro

El fruto conserva la mayor parte del pericarpio de color verde, aunque presenta zonas localizadas de oscurecimiento y pequeñas lesiones superficiales. Estos síntomas

son compatibles con las primeras etapas de colonización por microorganismos oportunistas o con daños mecánicos que favorecen posteriormente el ingreso de otros organismos asociados al deterioro sanitario.

Desde el punto de vista fitopatológico, la sintomatología observada podría ser compatible con fases iniciales de enfermedades descritas en frutos de Juglandaceae, entre ellas síntomas semejantes a antracnosis causada por especies del género *Colletotrichum* o a procesos de colonización superficial por otros hongos oportunistas. Sin embargo, estas observaciones deben considerarse únicamente presuntivas debido a la ausencia de análisis de laboratorio que permitan confirmar el agente causal.

En esta fase, la semilla probablemente conserva gran parte de su potencial fisiológico, por lo que la recolección oportuna de los frutos constituye una medida importante para reducir el avance del deterioro sanitario.

2. Fruto con necrosis avanzada del pericarpio

El fruto presenta un oscurecimiento generalizado del pericarpio acompañado de pérdida evidente de la integridad de los tejidos externos. Esta condición refleja un estado avanzado de deterioro que incrementa significativamente el riesgo de afectación interna de la semilla.

Los síntomas observados son compatibles con procesos de necrosis y pudrición descritos para diferentes hongos asociados a frutos de especies forestales, incluyendo sintomatologías semejantes a las producidas por especies de *Colletotrichum*, *Botryosphaeria* o *Phytophthora*. No obstante, la sintomatología macroscópica no permite diferenciar con certeza entre estos géneros, por lo que cualquier asignación taxonómica debe interpretarse como una hipótesis diagnóstica basada únicamente en la apariencia externa del fruto.

Desde una perspectiva práctica, frutos que presentan este nivel de deterioro deberían excluirse como fuente de semillas para programas de propagación debido a la elevada probabilidad de pérdida de viabilidad y disminución de la calidad fisiológica.

3. Endocarpio con colonización superficial compatible con deterioro poscosecha

En esta etapa el pericarpio ha desaparecido casi completamente y el endocarpio presenta zonas oscuras y alteraciones superficiales compatibles con procesos de colonización desarrollados durante el almacenamiento o en etapas finales de maduración.

La presencia de estas alteraciones podría estar asociada con microorganismos saprófitos de almacenamiento, entre ellos especies de los géneros *Aspergillus* y

Penicillium, ampliamente descritos en semillas almacenadas bajo condiciones de elevada humedad. Asimismo, no puede descartarse que perforaciones previas ocasionadas por insectos hayan favorecido el establecimiento de estos microorganismos.

Aunque la afectación parece limitarse principalmente a la superficie del endocarpio, la posibilidad de colonización interna incrementa el riesgo de pérdida parcial de las reservas y de reducción del potencial germinativo.

4. Endocarpio con deterioro estructural avanzado

El endocarpio presenta deformaciones, resequedad y un marcado deterioro de su estructura externa, evidenciando un estado avanzado de degradación.

Esta condición es compatible con procesos prolongados de deterioro durante el almacenamiento, favorecidos por humedad elevada, ventilación deficiente o permanencia excesiva de los frutos antes del beneficio. La sintomatología observada también podría corresponder a colonización por hongos oportunistas asociados al almacenamiento; sin embargo, la determinación del organismo responsable requeriría confirmación mediante aislamiento e identificación en laboratorio.

En términos funcionales, semillas que alcanzan este estado presentan una alta probabilidad de pérdida de viabilidad y una capacidad muy reducida para producir plántulas normales.

5. Semilla con colonización interna compatible con crecimiento fúngico

La sección transversal de la semilla evidencia tejido interno alterado y la presencia de estructuras blanquecinas con morfología compatible con crecimiento micelial. Esta observación indica un proceso avanzado de colonización interna y un deterioro severo de los tejidos de reserva.

Los síntomas observados son compatibles con la presencia de hongos de almacenamiento, particularmente especies pertenecientes a los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*, aunque esta interpretación debe considerarse presuntiva debido a que no se realizaron estudios microbiológicos para confirmar la identidad del microorganismo.

Desde el punto de vista fisiológico, semillas con este nivel de deterioro deben considerarse inadecuadas para programas de propagación, ya que la colonización interna compromete el embrión y reduce prácticamente a cero la probabilidad de obtener plántulas viables.

Interpretación integradora

La secuencia presentada en la Figura 7.9 evidencia que el deterioro sanitario de frutos y semillas de *J. neotropica* constituye un proceso progresivo en el que intervienen simultáneamente factores biológicos y de manejo. Los daños mecánicos, la acción de insectos, la elevada humedad y las condiciones inadecuadas de almacenamiento pueden actuar de manera conjunta, favoreciendo la colonización sucesiva por microorganismos oportunistas y reduciendo gradualmente la calidad fisiológica de las semillas.

En consecuencia, la evaluación sanitaria debe orientarse principalmente a la **detección temprana** de síntomas de deterioro y a la aplicación de medidas preventivas durante la cosecha, el beneficio y el almacenamiento. Asimismo, la identificación específica de los agentes causales requiere estudios microbiológicos complementarios, por lo que las observaciones presentadas en este capítulo constituyen una caracterización macroscópica con fines de evaluación sanitaria y no una identificación etiológica definitiva.

CAPÍTULO 8

Propagación y producción de plantas de *Juglans neotropica*

Capítulo
8

Propagación y producción de plantas de *Juglans neotropica*

Emergencia de una plántula de *J. neotropica* en el vivero de Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador. Fotografía: Mario Añazco.

La propagación constituye uno de los procesos más determinantes para la conservación, restauración, domesticación y establecimiento de plantaciones de *Juglans neotropica*. El éxito de este proceso depende de la interacción entre la calidad de las semillas, la superación de la dormancia, la selección de tratamientos pregerminativos, el uso de sustratos adecuados y la aplicación de prácticas culturales que favorezcan la producción de plántulas vigorosas (Figura 8.1).

Figura 8.1

Componentes fundamentales para la propagación y producción de plantas de Juglans neotropica

Nota. La propagación exitosa de *J. neotropica* depende de la interacción entre la calidad de las semillas, los tratamientos pregerminativos, los sustratos, la calidad de las plantas y el manejo en vivero. Estos componentes constituyen la base técnica para la producción de plantas vigorosas destinadas a programas de restauración, conservación, reforestación y establecimiento de plantaciones.

Este capítulo integra la evidencia experimental disponible sobre la propagación de *J. neotropica* generada en Ecuador y otros países andinos, analizando y comparando resultados provenientes de trabajos de titulación, proyectos de investigación, artículos científicos y observaciones derivadas del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

La información presentada no solo resume el conocimiento disponible, sino que interpreta los procesos fisiológicos que regulan la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas, proporcionando una base científica para optimizar la producción de material vegetal destinado a programas de restauración ecológica, conservación genética, sistemas agroforestales y plantaciones forestales.

8.1 Propagación sexual

La propagación sexual constituye el método más utilizado para la producción de plantas de *J. neotropica*, debido a su viabilidad técnica, facilidad de aplicación en viveros forestales y contribución a la conservación de la diversidad genética de la especie. Su éxito depende de la interacción de múltiples factores biológicos y operativos que influyen desde la maduración de los frutos hasta la obtención de plantas de calidad para su establecimiento en campo. Estos aspectos determinan el porcentaje y la velocidad de germinación, así como la calidad morfológica de las plántulas obtenidas en vivero.

8.1.1 Fundamentos biológicos y operativos de la propagación sexual

Antes de iniciar la propagación sexual de *J. neotropica* es indispensable comprender los procesos biológicos que regulan el comportamiento de sus semillas, desde la maduración del fruto hasta la emergencia de la plántula. La eficiencia de la propagación depende no solamente de la aplicación de tratamientos pregerminativos, sino también de factores como el grado de madurez fisiológica de los frutos, el comportamiento recalcitrante de las semillas, el almacenamiento, la presencia de dormancia, el tipo de germinación, la técnica de siembra y las condiciones de viverización. Estos aspectos determinan el porcentaje de germinación, la velocidad de emergencia y la calidad morfológica de las plantas producidas.

La propagación es el proceso mediante el cual se obtiene nuevo material vegetal destinado a la conservación, restauración, mejoramiento genético y producción forestal. En especies arbóreas, este proceso puede realizarse mediante propagación sexual, utilizando semillas, o mediante propagación asexual, empleando estructuras vegetativas como estacas, injertos o técnicas de cultivo in vitro (Hartmann et al., 2018).

En especies forestales tropicales, el éxito de la propagación depende de la interacción entre la calidad de las semillas, los mecanismos de dormancia, las condiciones ambientales y las prácticas de viverización. Estos factores regulan la velocidad de germinación, la uniformidad de emergencia y la calidad morfológica de las plantas producidas (Bewley et al., 2013; Landis et al., 2010).

En este contexto, *J. neotropica* presenta características particulares, entre ellas el comportamiento recalcitrante de sus semillas, la pérdida progresiva de viabilidad durante el almacenamiento y una germinación condicionada por factores físicos y fisiológicos. Estas particularidades hacen indispensable comprender los procesos que regulan la activación del embrión y establecer protocolos de propagación acordes con la biología de la especie. El primer paso para lograrlo consiste en identificar el momento óptimo de madurez de los frutos y aplicar procedimientos adecuados para la extracción y preparación de las semillas, aspectos que se desarrollan en el siguiente apartado.

8.1.1.1 Indicadores de madurez fisiológica y extracción de la pulpa de los frutos

La recolección de frutos de *J. neotropica* debe realizarse cuando alcanzan su madurez fisiológica. Los principales indicadores incluyen el incremento en el tamaño, el oscurecimiento progresivo del pericarpio y la caída natural del fruto. Estos signos permiten identificar el momento óptimo para la cosecha y asegurar la viabilidad de las semillas.

Debido a que los frutos son carnosos, un método común de extracción consiste en colocarlos en agua durante aproximadamente 72 horas. Este remojo favorece el ablandamiento de la pulpa y facilita la liberación de las semillas mediante un proceso manual de limpieza.

En la comunidad de Natabuela (Imbabura, Ecuador), los agricultores han desarrollado prácticas locales que combinan observación empírica y manejo agroecológico. Un ejemplo es la experiencia del señor Fabián Cerón (productor de la zona), quien permite que los frutos maduros caigan al suelo de manera natural. Allí, la pulpa inicia su descomposición y aparecen larvas, probablemente de mosca de la fruta *(Anastrepha fraterculus*). En este momento, el agricultor introduce gallinas en el área para que se alimenten de las larvas y, al mismo tiempo, colaboren en la remoción de la pulpa. Una vez eliminada la mayor parte del tejido carnoso, las semillas se recuperan y se lavan cuidadosamente, completando así el proceso de extracción.

Este método, aunque tradicional, constituye una estrategia práctica y sostenible que integra procesos biológicos naturales y manejo campesino, al tiempo que asegura la obtención de semillas viables para su propagación.

8.1.1.2. Semillas recalcitrantes

Las semillas de *J. neotropica* se clasifican dentro del grupo de **semillas recalcitrantes**, las cuales se caracterizan por su **escasa longevidad** y por su **incapacidad para ser almacenadas durante períodos prolongados**, especialmente bajo condiciones de desecación o bajas temperaturas. Este comportamiento implica una rápida pérdida de viabilidad tras la cosecha, lo que constituye una limitación importante para la conservación *ex situ*, el almacenamiento convencional de semillas y la planificación de la producción de plantas en vivero.

Las principales características fisiológicas que sustentan esta clasificación incluyen:

- **Alto contenido de humedad al momento de la dispersión**

  Las semillas maduras de especies recalcitrantes suelen ser de gran tamaño y se liberan de la planta madre con un contenido elevado de agua, generalmente superior al 40 % de su peso fresco. Este alto nivel de hidratación es esencial para mantener la viabilidad del embrión, pero las hace altamente susceptibles a la desecación (Baskin & Baskin, 2014; Hong & Ellis, 1996; Roberts, 1973).

- **Alta sensibilidad a la desecación**

  Las semillas recalcitrantes pierden rápidamente su viabilidad cuando su contenido de humedad desciende por debajo de umbrales críticos, comúnmente entre 30 y 35 %, debido a que no presentan mecanismos estructurales ni fisiológicos que les permitan tolerar la pérdida de agua. A diferencia de las semillas ortodoxas, los tejidos embrionarios permanecen metabólicamente activos y sufren daños irreversibles al secarse (Berjak & Pammenter, 2008).

- **Sensibilidad a bajas temperaturas**

  Estas semillas no toleran adecuadamente la refrigeración prolongada ni la crioconservación convencional, ya que las bajas temperaturas inducen alteraciones celulares y fisiológicas que reducen drásticamente la germinación y la viabilidad (Hong & Ellis, 1996; Tweddle et al., 2003).

- **Vida corta en almacenamiento**

  Como consecuencia de las características anteriores, la viabilidad de las semillas recalcitrantes suele perderse en un período de semanas a pocos meses fuera de condiciones muy específicas de manejo, lo que obliga a su siembra casi inmediata tras la recolección (Baskin & Baskin, 2014).

En este contexto, la **latencia o dormancia** debe distinguirse claramente de la pérdida de viabilidad. Una semilla se considera latente cuando, aun siendo viable, no germina bajo condiciones aparentemente adecuadas de agua, oxígeno y temperatura. La dormancia puede clasificarse en **innata (primaria), inducida (secundaria) o combinada**, según su origen y mecanismos fisiológicos subyacentes (Bewley et al., 2013), y puede coexistir con el comportamiento recalcitrante en especies forestales tropicales.

8.1.1.3. Almacenamiento

Ligado a la categoría de clasificación como semilla recalcitrante, las semillas de *J. neotropica* no toleran la deshidratación y deben mantenerse con alto contenido de humedad para sobrevivir. Para un almacenamiento prolongado, es necesario conservarlas con un contenido de humedad alto (entre 20 y 50 % de peso húmedo), lo cual no es viable para períodos largos, pero sí pueden conservarse por períodos cortos en la nevera.

Palacios et al. (2025c) al realizar un estudio de tres procedencias de *J. neotropica* en la provincia de Loja, señala que los resultados muestran claramente que las semillas de las tres localidades pierden humedad gradualmente con el tiempo, y su viabilidad del 100 % se ha confirmado hasta seis meses de almacenamiento. Más allá de ese período, se ha demostrado que incluso una pérdida de humedad del 2 % conlleva una pérdida de viabilidad.

8.1.1.4. Dormancia en J. neotropica

Las semillas de nogal andino presentan una germinación lenta y asincrónica, asociada con mecanismos de latencia cuya naturaleza y magnitud pueden variar entre lotes y procedencias. En la literatura sobre la especie se han relacionado estas limitaciones con la resistencia de las cubiertas del fruto y la semilla y con procesos fisiológicos del embrión; por ello, la clasificación precisa del tipo de dormancia debe interpretarse con cautela y no inferirse únicamente a partir de la respuesta a tratamientos pregerminativos (Orellana & Romero, 2018).

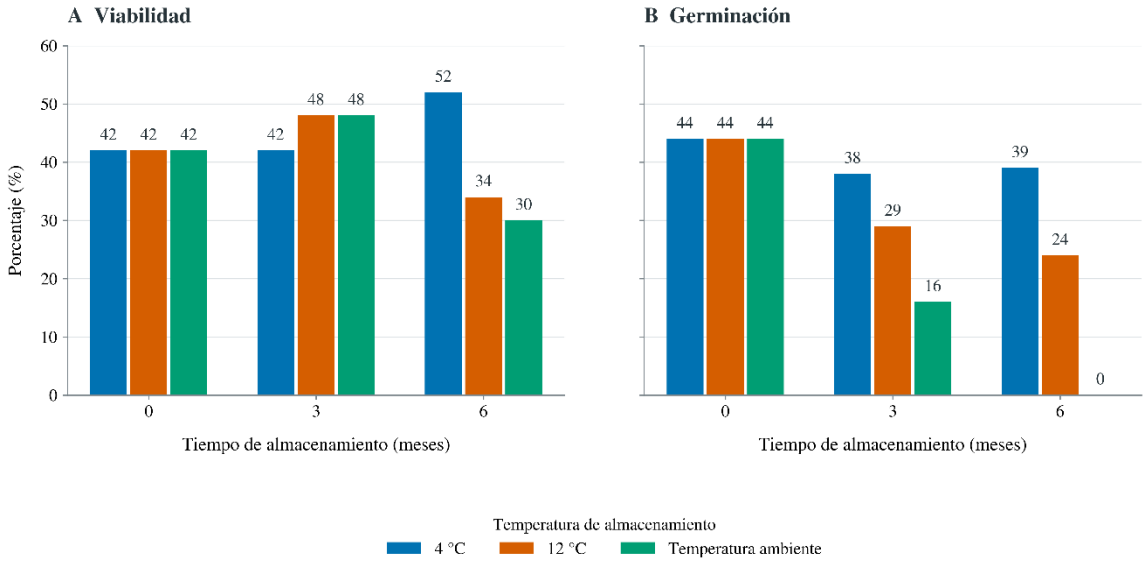
Además de las características generales de las semillas y la calidad de estas (capítulo 7), los dos factores clave que inciden en el éxito de la propagación sexual de esta especie son los tratamientos pregerminativos y los sustratos empleados en los diferentes medios de cultivo.

8.1.1.5. Discrepancia entre viabilidad y germinación

Una semilla viable no necesariamente germina, debido a que la viabilidad indica que el embrión conserva la capacidad de desarrollar una plántula bajo condiciones favorables, mientras que la germinación requiere además que se superen las restricciones fisiológicas o físicas existentes y que se presenten condiciones ambientales adecuadas para iniciar y completar el proceso germinativo. Esta discrepancia ha sido documentada en *J. neotropica* en estudios realizados en Colombia y Ecuador; por ejemplo (Ceballos & López, 2007; Palacios et al., 2025c) y los experimentos desarrollados entre 2023 y 2025 por el Programa de Investigación *Juglans* registraron diferencias entre los porcentajes de viabilidad y germinación de las semillas (Figura 8.2).

Figura 8.2

Discrepancia entre viabilidad y germinación de semillas de Juglans neotropica



Nota. Elaboración propia con base en Ceballos & López (2007), Palacios et al. (2025c) y resultados experimentales del Programa de Investigación *Juglans* (2023–2025).

En los ensayos de almacenamiento, la prueba de tinción con sales de tetrazolio mostró que las semillas conservadas a 4, 12 y 20 °C mantuvieron porcentajes de viabilidad relativamente similares hasta el sexto mes, con fluctuaciones reducidas respecto de la viabilidad inicial. Sin embargo, este comportamiento no se correspondió necesariamente con la capacidad germinativa de las semillas.

A 4 °C, el análisis de varianza no mostró diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de germinación durante los seis meses de almacenamiento, lo que indica una mayor estabilidad de la respuesta germinativa bajo esta condición. En cambio, a 12 °C se registraron diferencias significativas y una disminución de la germinación a partir del tercer mes, tendencia que se mantuvo hasta el sexto mes.

A temperatura ambiente, la reducción de la capacidad germinativa fue más pronunciada. A los tres meses se observó una disminución importante del porcentaje de germinación y, al sexto mes, las semillas evaluadas no germinaron. Estos resultados muestran que la conservación de la viabilidad determinada mediante tetrazolio no necesariamente se traduce en una respuesta germinativa equivalente.

La diferencia observada entre viabilidad y germinación puede estar relacionada con mecanismos de dormancia que impiden que semillas viables expresen inmediatamente su capacidad germinativa. Por esta razón, ambos indicadores deben interpretarse de manera complementaria: la prueba de viabilidad permite estimar el potencial de las semillas para producir plántulas, mientras que el ensayo de germinación determina la proporción que efectivamente germina bajo las condiciones y durante el período de evaluación establecidos.

8.1.1.6. Germinación asincrónica

Una particularidad relevante de *J. neotropica* es la **germinación asincrónica**, caracterizada por el inicio escalonado del proceso germinativo entre semillas de un mismo lote: mientras algunas germinan poco tiempo después de la siembra, otras lo hacen días, semanas o incluso meses más tarde. Este patrón está estrechamente asociado a la **presencia de distintos tipos de dormancia**, los cuales limitan la germinación simultánea aun cuando las condiciones ambientales son aparentemente favorables.

La germinación asincrónica ha sido descrita y abordada desde diferentes disciplinas de las ciencias forestales y biológicas, recibiendo denominaciones específicas según el enfoque de análisis. En ecología y dinámica poblacional se reconoce como **cohortes de germinación**, aludiendo a pulsos temporales de emergencia que influyen en la estructura de las poblaciones. En fisiología vegetal y biología de semillas se relaciona con **dormancia intermitente o combinada**, mientras que en silvicultura se describe como **emergencia prolongada**, debido a sus implicaciones prácticas en la producción de plantas en vivero. Desde la genética y la biología evolutiva, este fenómeno se interpreta como una forma de **plasticidad germinativa**, que incrementa la probabilidad de establecimiento bajo condiciones ambientales variables y reduce el riesgo de fracaso reproductivo (Baskin & Baskin, 2014; Bewley et al., 2013).

8.1.1.7. Tipo de germinación

La germinación de *J. neotropica* al igual que otras especies del género *Juglans* (Flores et al., 2018), es de tipo hipógea criptocotilar. En este proceso, los cotiledones permanecen ocultos dentro de la semilla, enterrados en el suelo, sin emerger a la superficie. Al no ser fotosintéticos, cumplen una función de reserva, aportando nutrientes esenciales al embrión en las primeras fases de desarrollo. Durante este estadio, es el epicótilo el que se alarga y emerge hacia la superficie, mientras que la plántula se caracteriza por un crecimiento inicial lento y por la formación temprana de una raíz pivotante, una estrategia adaptativa de la especie.

8.1.1.8. Técnica de siembra de la semilla

En *J. neotropica*, la orientación de la semilla en la siembra **influye bastante en la germinación**, porque el embrión y el eje radicular deben tener la menor resistencia posible para emerger.

Morfología de la semilla

- La nuez tiene una **punta más delgada o ápice** (por donde estuvo el estilo) y una **base más ancha** (donde se unía al pedúnculo).
- El embrión se ubica en la parte basal; de allí emerge la radícula.
- Durante la germinación de la semilla, el hipocótilo aparece en la parte acuminada y la radícula se dirige al extremo grueso de la nuez bordeando el cuerpo de esta (Barreto Ávila et al., 1990).

Recomendación práctica para la siembra

1. Colocar la semilla en posición horizontal. Esto facilita que la radícula crezca directamente hacia abajo y el brote hacia arriba (Figura 8.3 a).
2. La posición horizontal garantiza un adecuado desarrollo de la raíz (Figura 8.3 b).
3. No sembrar con la punta hacia arriba, porque se genera un sistema radicular mal formado que podría repercutir en el crecimiento y desarrollo de la planta en la plantación definitiva (Figura 8.3 c).

Figura 8.3

Posición y técnicas de siembra de las semillas de Juglans neotropica

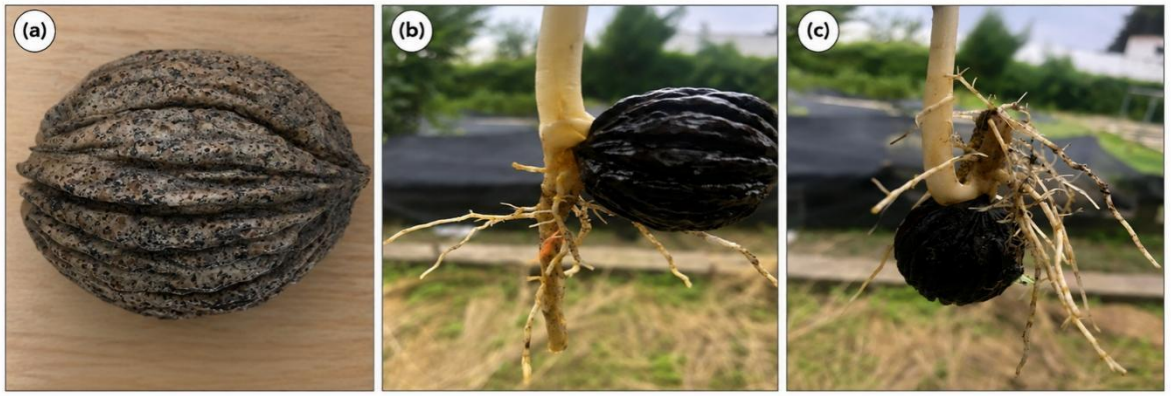


Figura 8.3a
Posición horizontal para la siembra de la semilla de *J. neotropica*.

Figura 8.3b
Técnica adecuada de siembra de la semilla de *J. neotropica* (posición horizontal).

Nota. Sistema radicular bien conformado, caracterizado por una raíz pivotante recta y funcional, con adecuada ramificación lateral, resultado de la siembra de la semilla en posición horizontal.

Figura 8.3c
Técnica inadecuada de siembra de la semilla de *J. neotropica* (punta hacia arriba).

Nota. Malformación radicular caracterizada por curvatura de la raíz pivotante tipo J, engrosamiento del cuello y emisión de raíces adventicias, causada por la siembra de la semilla con la punta orientada hacia arriba.

Nota. Delgado & Torres (1995), encontraron que la pudrición radicular aparece en las lesiones que se producen al deformarse el cuello de la raíz, lo cual ocurre cuando se siembra la semilla en posición inadecuada.

8.1.1.9. Contenedores para la producción de plántulas de J. neotropica en vivero

La propagación sexual mediante semillas constituye la técnica más empleada para la multiplicación de *J. neotropica* en Ecuador. Usualmente, las semillas se siembran directamente en el contenedor de producción, donde las plántulas permanecen durante su desarrollo en vivero hasta alcanzar las condiciones requeridas para su traslado al sitio definitivo. Esta práctica evita el repique o trasplante desde almácigos y reduce la manipulación del sistema radical durante las primeras etapas de crecimiento.

La funda de polietileno de color negro constituye el contenedor más frecuentemente utilizado para la producción de plántulas de *J. neotropica* en los viveros evaluados en Ecuador (Figura 8.4). Las dimensiones de las fundas varían principalmente en función del tiempo previsto de permanencia de las plantas en vivero, el tamaño esperado de las plántulas, los costos de producción y las condiciones de transporte hacia el sitio definitivo de plantación. De manera general, se utilizan fundas con volúmenes que oscilan entre 1 000 y 5 000 cm^3.

Figura 8.4

Plántulas de Juglans neotropica producidas en fundas de polietileno en el vivero Yuyucocha, Imbabura, Ecuador

Las fundas de mayor tamaño proporcionan un mayor volumen de sustrato y espacio para el desarrollo del sistema radical, lo que puede reducir las restricciones físicas al crecimiento de las raíces y aumentar la disponibilidad potencial de agua y nutrientes. Estas condiciones pueden favorecer el desarrollo de determinados atributos morfológicos de las plántulas, como la altura, el diámetro del cuello y el desarrollo radical. Sin embargo, un mayor volumen de contenedor no implica necesariamente una mejor calidad de planta, ya que esta depende también de las características del sustrato, la disponibilidad de agua y nutrientes, la densidad de cultivo, el tiempo de permanencia en vivero y las prácticas de manejo aplicadas.

Desde el punto de vista económico, el uso de fundas grandes implica mayores costos de producción asociados al precio del contenedor, al incremento en la cantidad de sustrato y a la mano de obra requerida. A ello se suman mayores necesidades de riego e insumos (incluyendo agroquímicos) así como un incremento en los costos logísticos, ya que ocupan más espacio en los vehículos de transporte hacia el sitio de plantación.

En contraste, las fundas de menor volumen resultan más prácticas y económicas para el transporte a largas distancias, debido a su menor peso y menor ocupación de espacio. Esta ventaja es aún más relevante en sitios de plantación de difícil acceso vehicular, donde se requiere acarreo manual o el uso de animales de carga, situación frecuente en zonas montañosas de los Andes ecuatorianos. Sin embargo, las plántulas

producidas en este tipo de fundas suelen presentar menor calidad morfológica, lo que puede comprometer su desempeño en campo.

Por lo tanto, el verdadero reto consiste en encontrar un equilibrio entre la calidad de la plántula, los costos de producción y las condiciones logísticas de transporte hacia el sitio definitivo de plantación. Este balance no solo permitirá optimizar recursos y mejorar la eficiencia del proceso, sino también garantizar que las plántulas establecidas en campo tengan mayores probabilidades de supervivencia y buen desarrollo, contribuyendo así al éxito de los programas de reforestación y restauración en el largo plazo.

8.1.1.10. Tratamientos pregerminativos

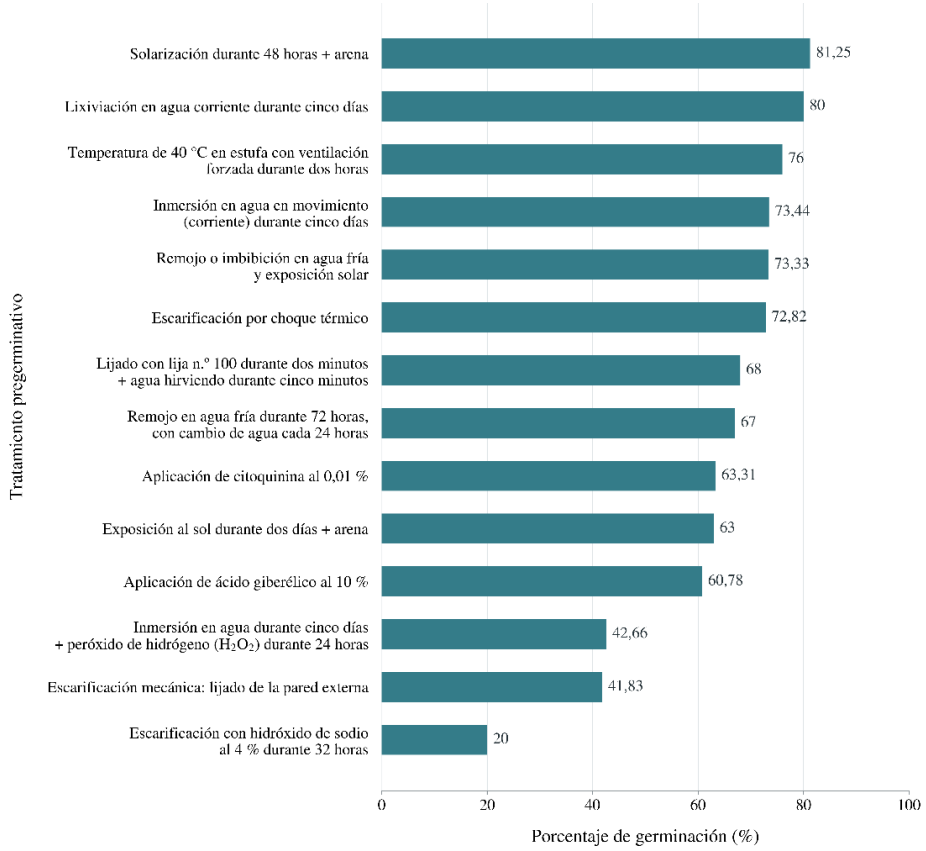
Los tratamientos pregerminativos constituyen una herramienta importante para favorecer la germinación de las semillas de *J. neotropica*, particularmente cuando existen mecanismos de dormancia que retrasan o reducen la emergencia. Su aplicación puede contribuir a incrementar el porcentaje de germinación, reducir el tiempo requerido para este proceso y mejorar la eficiencia de la producción de plántulas en vivero.

En los últimos años, diversos estudios realizados en Ecuador han evaluado métodos químicos, físicos, mecánicos, fisiológicos y biológicos como tratamientos pregerminativos para las semillas de *J. neotropica*. Los resultados muestran respuestas variables en función del tipo de tratamiento, la procedencia del material vegetal, las condiciones experimentales y el tiempo de evaluación.

En este apartado se sintetizan las experiencias reportadas en Ecuador, con énfasis en la relación entre el tipo de tratamiento aplicado y el porcentaje final de germinación. La Figura 8.5 integra los resultados más representativos obtenidos entre 2022 y 2025 y permite comparar la respuesta germinativa alcanzada mediante los diferentes métodos evaluados.

Figura 8.5

Relación entre los tratamientos pregerminativos y el porcentaje de germinación de semillas de Juglans neotropica



Nota. Elaboración propia a partir de los estudios citados en este apartado y de resultados experimentales del Programa de Investigación *Juglans* (2022–2025).

8.1.1.10.1. Tratamientos químicos

Los ensayos químicos incluyeron el uso de hidróxido de sodio (NaOH), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), citoquininas y ácido giberélico. Los resultados muestran una respuesta altamente variable, dependiente tanto de la sustancia como de la concentración y el tiempo de exposición.

Escarificación con NaOH (4 % por 32 horas): reportó apenas un **20 % de germinación** (Fonseca, 2023). Aunque el NaOH actúa como agente corrosivo para ablandar el tegumento, en este caso la exposición prolongada parece haber generado efectos fitotóxicos que redujeron drásticamente la viabilidad. Este resultado indica que el hidróxido de sodio no es un tratamiento recomendable para *J. neotropica*, al menos en las condiciones evaluadas (Fonseca et al., 2023).

Inmersión combinada en agua y H_2O_2: alcanzó un **42,66 % de germinación** (Esparza, 2023), duplicando el valor del NaOH. El peróxido, conocido por su capacidad de oxidar compuestos inhibidores y desinfectar la semilla, parece favorecer la ruptura parcial de la dormancia. Sin embargo, su eficacia es moderada en comparación con otros tratamientos físicos y mecánicos.

Reguladores de crecimiento: la aplicación de **citoquinina al 0,01 %** obtuvo un **63,31 % de germinación**, mientras que el **ácido giberélico al 10 %** alcanzó un **60,78 %** (Villagrán, 2023). Estos resultados confirman que la regulación hormonal desempeña un papel clave en la activación metabólica y el alargamiento celular del embrión. Además, al extenderse el periodo de evaluación hasta 120 días, se evidencia que la acción de los fitorreguladores requiere más tiempo para manifestarse plenamente en comparación con otros métodos.

Séptimo Díaz (2020) en Perú evaluó el efecto del ácido giberélico (AG), ácido indolbutírico (AIB) y agua de coco sobre la germinación de semillas de *J. neotropica* utilizando un diseño completamente al azar con siete tratamientos y tres repeticiones. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos, destacando el uso de ácido giberélico a una dosis de 1 000 ppm, que alcanzó el mayor porcentaje de germinación (60,23 %), además de mejores valores en variables de crecimiento como longitud de raíz (13,14 cm), altura de planta (35,33 cm) y número promedio de hojas (49,9). En general, los tratamientos químicos son efectivos, pero no alcanzan los valores más altos observados en los tratamientos físicos o mecánicos. Su ventaja radica en su aplicabilidad controlada en laboratorio y vivero, aunque los costos y la necesidad de insumos específicos pueden limitar su adopción en contextos comunitarios o rurales.

8.1.1.10.2. Tratamientos físicos

Los métodos físicos fueron los más consistentes y eficaces en términos de porcentajes de germinación. Estos tratamientos se basan en la modificación de la hidratación y de las condiciones de temperatura y exposición ambiental.

Solarización por 48 horas más arena: registró el mayor porcentaje de germinación con 81,25 % en un estudio realizado con semillas procedentes de la provincia de Bolívar. Este resultado coincide con un estudio realizado en Perú, donde se determinó que la exposición al sol durante tres días alcanzó el mayor porcentaje; sin embargo, la germinación fue del 61 %, inferior a la registrada en Ecuador (Silva Valqui, 2017).

Los resultados de otro estudio en Perú realizado por Maldonado Montenegro (2023), mostraron que la solarización alcanzó el mayor porcentaje de germinación (60 %), mientras que el tratamiento con ácido sulfúrico favoreció significativamente el crecimiento inicial de las plántulas, registrando mayores valores de altura y diámetro del tallo, así como un mayor número de plantas vigorosas. Estos resultados evidencian que la solarización es un método eficiente para estimular la germinación de las semillas de nogal, mientras que el tratamiento químico con ácido sulfúrico contribuye a mejorar el

desarrollo vegetativo inicial de las plántulas, lo cual es relevante para programas de producción de plantones y reforestación con esta especie (Maldonado Montenegro, 2023).

Lixiviación en agua corriente por cinco días: obtuvo un **80 % de germinación** en Imbabura (Ramírez-López et al., 2023) y **73,44 % en Bolívar** (Azas, 2016). Este resultado sugiere que la remoción progresiva de inhibidores químicos presentes en la testa y el endospermo es un mecanismo determinante para mejorar la germinación.

Temperatura controlada (40 °C por dos horas en estufa con ventilación forzada): alcanzó un **76 % de germinación** (Cué et al., 2024). La aplicación de calor moderado parece haber debilitado las capas externas de la semilla sin afectar al embrión, promoviendo una imbibición más rápida.

Remojo e imbibición en agua fría con exposición solar: registró un **73,33 % de germinación** (Márquez, 2024), resultado cercano al tratamiento térmico. Esta combinación refleja una alternativa de bajo costo y factibilidad en viveros comunitarios.

Escarificación-choque térmico: **registro un 72, 82 % de germinación**, estudio realizado en la Provincia de Chimborazo (Almeida, 2020).

Otros métodos físicos no publicados: (exposición al sol + arena, remojo prolongado en agua con recambio) presentaron porcentajes intermedios (63–67 %). Aunque menores, estos valores superan ampliamente los logrados con NaOH y H_2O_2, confirmando que la hidratación controlada es un factor central para romper la latencia.

La aplicación de tratamientos de irradiación no ionizante, láser verde, no mostraron un efecto positivo en la emergencia y crecimiento dasométrico temprano de plántulas de *J. neotropica*, por lo que se intuye que esta herramienta no supera la latencia física y fisiológica que experimentan las semillas de esta especie (Romero-Guaicha, 2025).

8.1.1.10.3. Tratamientos mecánicos

Los métodos mecánicos evaluados consistieron en lijar la testa con abrasivos de distinto grosor, en algunos casos combinados con agua caliente.

Lijado con lija #80 (5 min): obtuvo un **70 % de germinación**, resultado muy cercano a los mejores tratamientos físicos.

Lijado con lija #100 (2 min) + inmersión en agua hirviendo (5 min): registró un **68 % de germinación**, confirmando que la abrasión combinada con calor puede ser efectiva, aunque con riesgos de dañar el embrión si no se controlan los tiempos.

Escarificación mecánica: lijado de la pared externa: registro 41,83 % de germinación.

Estos resultados demuestran que la eliminación parcial de la cubierta seminal constituye un mecanismo eficiente para promover la imbibición. Además, se trata de un método accesible y replicable, aunque exige destreza técnica para evitar daños excesivos en la semilla.

8.1.1.10.4. Tratamientos fisiológicos

El objetivo es activar procesos metabólicos internos de la semilla antes de la germinación, sin llegar a que la radícula emerja. Esto mejora la velocidad y uniformidad de germinación. **Consiste en hidratar las semillas en** soluciones osmóticas (por ejemplo: PEG, sales o azúcares), la solución controla la entrada de agua, evitando que la semilla germine completamente. Durante ese tiempo se activan procesos fisiológicos como: reparación de membranas, activación de enzimas e inicio del metabolismo de germinación.

En Colombia, López (1999) y López & Piedrahíta (1998) señalan que los resultados de los ensayos indican que los tratamientos de osmoacondicionamiento, también llamado *osmopriming*, fueron efectivos para aumentar la velocidad de germinación y el vigor de la Semilla.

8.1.1.10.5. Tratamientos biológicos

Las semillas de *J. neotropica* pueden someterse a un tratamiento pregerminativo mediante fermentación biológica. Las semillas se sumergen en una solución de agua con estiércol fresco de ganado vacuno dentro de un recipiente cerrado durante aproximadamente 15 días.

Durante este proceso ocurre fermentación microbiana, en la cual bacterias y hongos del estiércol producen enzimas que ablandan la testa de la semilla, favoreciendo la imbibición de agua y facilitando la germinación. Este mecanismo funciona como una forma de escarificación biológica.

Luego del tratamiento, las semillas se retiran, se lavan con agua limpia y se siembran en el vivero. Este método puede mejorar la germinación y la uniformidad de emergencia en comparación con semillas sin tratamiento pregerminativo.

8.1.1.10.6 Comparación general e interpretación ecofisiológica de los tratamientos pregerminativos

Los diferentes tratamientos pregerminativos evaluados en *J. neotropica* evidencian que la respuesta germinativa depende del mecanismo fisiológico mediante el cual cada tratamiento actúa sobre la semilla. En términos generales, los tratamientos físicos registraron los mayores porcentajes de germinación, alcanzando valores de hasta 81,25 %, seguidos por los tratamientos mecánicos, mientras que los tratamientos

químicos mostraron respuestas más variables, estrechamente relacionadas con la concentración de las sustancias utilizadas y el tiempo de exposición.

La respuesta favorable observada con algunos tratamientos físicos puede relacionarse con procesos que facilitan la hidratación de la semilla y modifican las barreras que limitan la germinación. Sin embargo, los estudios considerados en este capítulo evaluaron principalmente respuestas germinativas y no midieron directamente cambios hormonales, respiratorios o bioquímicos en *J. neotropica*; por ello, estos mecanismos deben entenderse como explicaciones fisiológicas plausibles sustentadas en la literatura general sobre semillas y no como procesos demostrados experimentalmente para cada tratamiento en esta especie.

En términos generales, la germinación implica cambios hormonales y metabólicos que favorecen la movilización de reservas y el crecimiento del embrión. En *J. neotropica*, la participación específica de ABA, giberelinas y enzimas hidrolíticas requiere estudios fisiológicos directos antes de atribuir a estos mecanismos las diferencias observadas entre tratamientos.

Los tratamientos mecánicos producen un efecto similar al reducir parcialmente la resistencia física de la testa, facilitando la entrada de agua y oxígeno hacia el embrión. No obstante, requieren mayor precisión durante su aplicación, ya que una abrasión excesiva puede ocasionar daños irreversibles en los tejidos embrionarios y disminuir la viabilidad de la semilla.

En contraste, los tratamientos químicos mostraron una respuesta más heterogénea. Mientras que los reguladores de crecimiento, como el ácido giberélico y las citoquininas, estimularon la activación metabólica del embrión y favorecieron la germinación, sustancias altamente corrosivas, como el hidróxido de sodio, ocasionaron efectos fitotóxicos cuando fueron aplicadas durante tiempos prolongados, reduciendo considerablemente el porcentaje de germinación.

En conjunto, la evidencia disponible indica que la latencia de *J. neotropica* responde principalmente a mecanismos físico-fisiológicos relacionados con la dureza de la testa y la presencia de inhibidores de la germinación. Por esta razón, los tratamientos que favorecen la hidratación progresiva de la semilla y la activación metabólica del embrión constituyen las alternativas más eficientes para la producción de plántulas en vivero.

La Tabla 8.1 sintetiza los principales tratamientos pregerminativos evaluados para *J. neotropica*, comparando el tipo de barrera que cada uno contribuye a superar, su mecanismo fisiológico de acción, el porcentaje máximo de germinación alcanzado, sus ventajas, limitaciones, costos relativos y nivel de recomendación para programas de producción de plantas en vivero.

Tabla 8.1

Comparación técnica de los tratamientos pregerminativos utilizados en Juglans neotropica

Tipo de tratamiento	Ejemplos	Barrera que supera o reduce	Mecanismo fisiológico predominante	Máximo porcentaje registrado (%)	Ventajas	Limitaciones	Costo relativo	Recomendación
Físico	Lixiviación, remojo, solarización, choque térmico.	Dormancia física e inhibidores superficiales.	Favorece la imbibición, elimina parcialmente ABA y compuestos fenólicos, reactiva el metabolismo embrionario.	81,25	Alta eficacia; bajo costo; fácil aplicación.	Controlar tiempo de exposición.	●	★★★
Mecánico	Lijado o escarificación de la testa.	Resistencia mecánica de la testa.	Facilita la entrada de agua y oxígeno al embrión.	70	Método sencillo y económico.	Puede lesionar el embrión.	●	★★
Químico	NaOH, H_2O_2	Impermeabilidad e inhibidores químicos.	Modifica el tegumento y favorece la permeabilidad.	20–43	Aplicación rápida.	Riesgo de fitotoxicidad.	●●●	★
Hormonal (fisiológico)	Ácido giberélico, citoquininas.	Dormancia fisiológica.	Incrementa la relación GA/ABA y activa enzimas hidrolíticas	63	Favorece vigor y uniformidad.	Mayor costo y manejo especializado.	●●●●	★★
Biológico	Fermentación con estiércol.	Barrera física por degradación microbiana.	Escarificación biológica y activación gradual.	Información insuficiente.	Muy bajo costo; tecnología local.	Mayor tiempo y variabilidad.	●	★★

Nota. ABA = ácido abscísico; GA = giberelinas. Costo relativo: ● = muy bajo; ●● = bajo; ●●● = medio; ●●●● = alto. Nivel de recomendación: ★★★ = altamente recomendado; ★★ = recomendado para condiciones específicas; ★ = uso restringido o principalmente experimental**.** La clasificación integra los resultados experimentales analizados en este capítulo y la literatura científica disponible sobre propagación de *J. neotropica*.

8.1.1.10.7 Recomendaciones para la propagación en vivero

Con base en la evidencia científica disponible, los tratamientos físicos constituyen la alternativa más recomendable para la propagación de *J. neotropica*, debido a su elevada efectividad, bajo costo de implementación y facilidad de aplicación en viveros forestales. Entre ellos destacan la lixiviación en agua corriente y la solarización, las cuales presentan consistentemente los mayores porcentajes de germinación y no generan daños sobre el embrión cuando se aplican correctamente.

Los tratamientos mecánicos representan una alternativa complementaria, particularmente cuando se requiere acelerar la germinación de pequeños lotes de semillas. Sin embargo, su éxito depende de la experiencia del operador, debido al riesgo de afectar la integridad del embrión durante el proceso de escarificación.

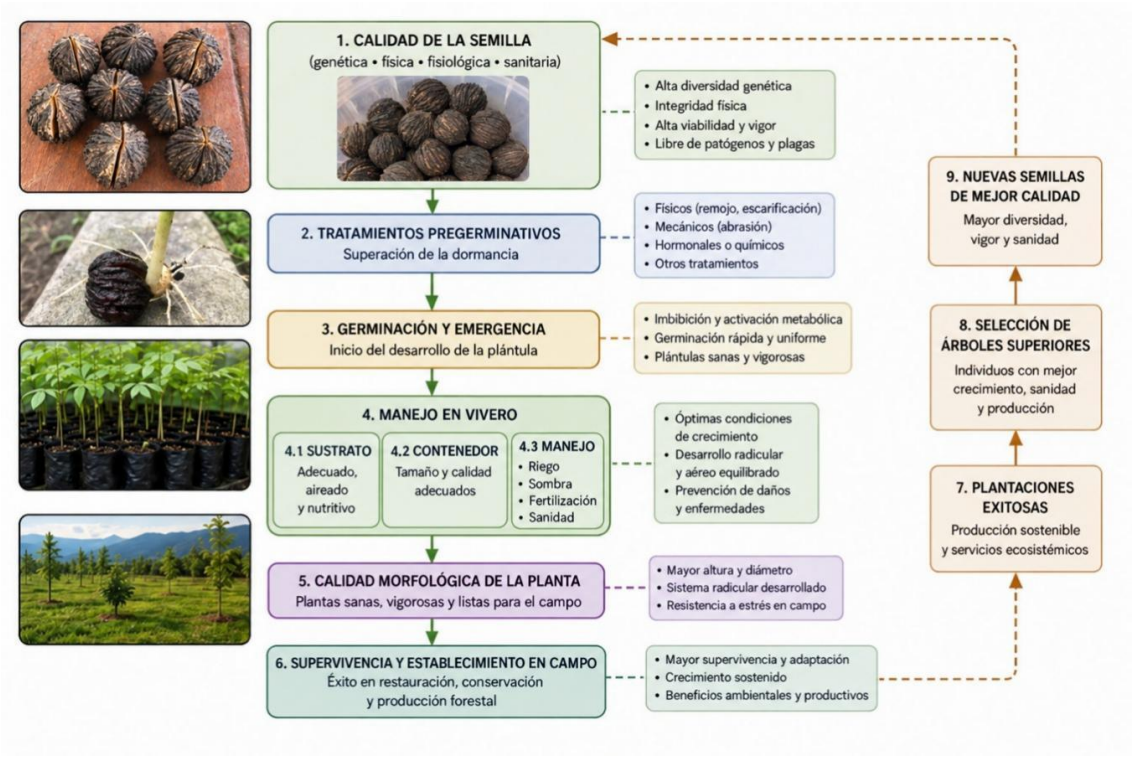
Los tratamientos hormonales pueden resultar útiles en investigaciones orientadas a comprender la fisiología de la germinación o en sistemas especializados de producción de plantas, mientras que los tratamientos químicos agresivos no se recomiendan para programas rutinarios de viverización, debido a su elevada variabilidad y al riesgo de reducir la viabilidad de las semillas.

En consecuencia, para programas de restauración ecológica, conservación genética, sistemas agroforestales y plantaciones forestales, se recomienda priorizar protocolos de propagación basados en tratamientos físicos, complementados con semillas de alta calidad fisiológica, sustratos adecuados y un manejo integral del vivero, condiciones que permiten maximizar la producción de plantas vigorosas y mejorar el éxito del establecimiento en campo.

La Figura 8.6 integra conceptualmente los principales factores que determinan el éxito de la propagación sexual de *J. neotropica*, mostrando la interacción entre la calidad fisiológica de las semillas, los tratamientos pregerminativos, el manejo en vivero y la calidad final de las plantas producidas.

Figura 8.6

Modelo conceptual para la producción sostenible de plantas de calidad de Juglans neotropica



Nota. Esquema integrador del proceso de propagación sexual de *J. neotropica*, desde la selección de frutos y semillas hasta la producción de plantas de calidad para su establecimiento en campo. El modelo incorpora un ciclo de retroalimentación basado en la selección de árboles superiores, orientado al mejoramiento continuo de la calidad de las semillas y de los programas de propagación.

La selección del tratamiento pregerminativo deberá considerar simultáneamente la calidad fisiológica de la semilla, la disponibilidad de infraestructura en vivero, los costos operativos y el destino final de las plantas, de manera que el protocolo adoptado responda tanto a criterios biológicos como técnicos y económicos.

8.1.2. Sustratos

El sustrato constituye uno de los factores más determinantes para la producción de plántulas de calidad, ya que regula simultáneamente la disponibilidad de agua, la aireación, el soporte mecánico de las raíces y el suministro de nutrientes. En *J. neotropica*, el equilibrio entre las propiedades físicas y químicas del sustrato condiciona tanto la germinación como el desarrollo inicial de las plántulas. Los rangos ideales de estas propiedades se presentan en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2

Propiedades físicas y químicas recomendadas para sustratos destinados a la producción de plántulas de Juglans neotropica

Categoría	Parámetro	Rango ideal	Observación
Propiedades físicas	Porosidad total.	70 – 85 %	Espacio adecuado para agua y aire.
	Porosidad de aireación.	20 – 30 %	Evita anoxia radicular y mejora respiración.
	Capacidad de retención de agua.	40 – 60 %	Mantiene humedad sin saturación.
	Tamaño de partículas (diámetro medio ponderado).	0,25 – 2,0 mm	Equilibrio entre fracción fina y gruesa.
	Densidad aparente.	0,25 – 0,45 g/cm	Soporte adecuado para raíz pivotante.
Propiedades químicas	pH	5,5 – 6,5	Favorece disponibilidad de nutrientes.
	Conductividad eléctrica (CE)	< 1,5 dS/m	Evita estrés salino.
	Materia orgánica	40 – 60 %	Aporta nutrientes y estabilidad estructural.
	Relación C/N	20 – 25:1	Equilibrio entre mineralización y disponibilidad de N.
	N total	0,8 – 1,5 %	Necesario para crecimiento inicial.
	P disponible	50 – 150 mg/kg	Favorece desarrollo radicular.

Tabla 8.2 (continuación)

Propiedades físicas y químicas recomendadas para sustratos destinados a la producción de plántulas de Juglans neotropica

Categoría	Parámetro	Rango ideal	Observación
	K intercambiable	150 – 300 mg/kg	Regula balance hídrico y vigor.
	Ca	1,0 – 2,0 cmol(+)/kg	Esencial para estructura celular.
	Mg	0,5 – 1,0 cmol(+)/kg	Cofactor enzimático y fotosíntesis.
	Fe	50 – 150 mg/kg	Previene clorosis en suelos ácidos.
	Mn	20 – 100 mg/kg	Importante en procesos enzimáticos.
	Zn	10 – 50 mg/kg	Favorece síntesis de hormonas de crecimiento.
	Cu	5 – 20 mg/kg	Participa en lignificación.
	B	0,5 – 2,0 mg/kg	Esencial para división celular y crecimiento apical.

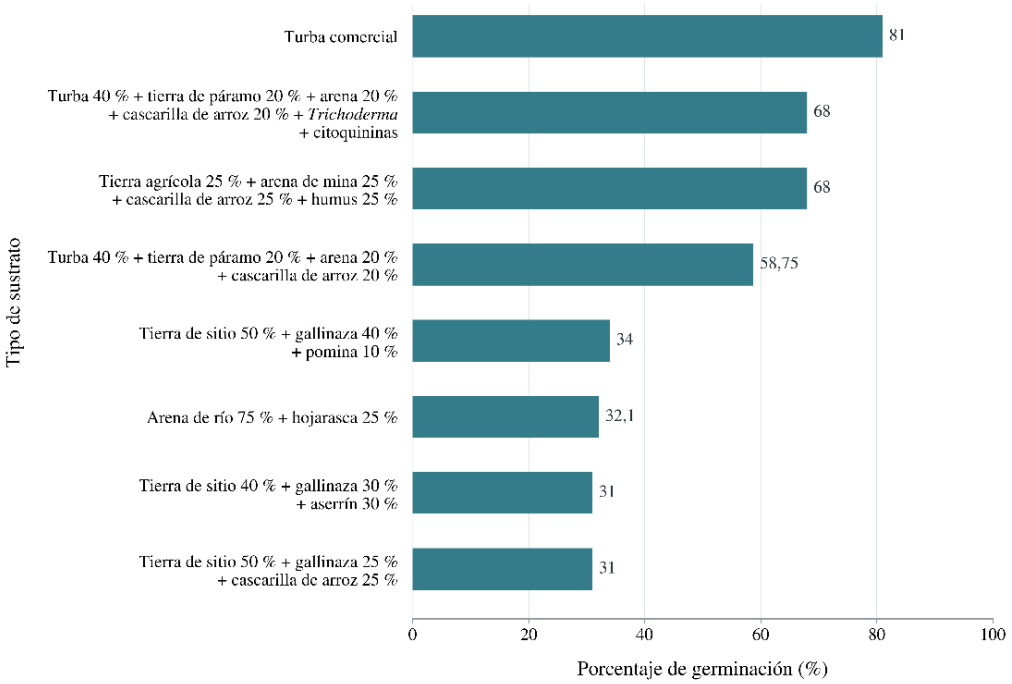
Nota. Rangos de referencia elaborados a partir de la literatura especializada sobre producción de plantas forestales y manejo de sustratos (Abad et al., 2001; Cabrera, 1999; Hartmann et al., 2018; Landis et al., 2010), adaptados a los requerimientos fisiológicos de *J. neotropica*.

8.1.2.1. Análisis comparativo de la germinación en diferentes sustratos y regiones del Ecuador

Los estudios realizados en diferentes regiones del Ecuador muestran una amplia variación en los porcentajes de germinación de *J. neotropica* obtenidos con distintos tipos y combinaciones de sustratos. Debido a que estos resultados proceden de investigaciones desarrolladas bajo diferentes condiciones experimentales, con semillas de distintas procedencias y períodos de evaluación variables, las comparaciones deben interpretarse como **tendencias entre las experiencias analizadas y no como efectos atribuibles exclusivamente al tipo de sustrato o a la región de estudio**. La Figura 8.7 sintetiza los porcentajes de germinación reportados en los estudios considerados.

Figura 8.7

Porcentaje de germinación de Juglans neotropica en diferentes tipos de sustrato y regiones del Ecuador



Nota. Elaboración a partir de los resultados de los estudios citados en este apartado. Los valores corresponden a investigaciones realizadas bajo diferentes condiciones experimentales, por lo que su comparación representa tendencias generales y no un ensayo conjunto de los sustratos evaluados.

Región Sur (provincia de Loja – Universidad Nacional de Loja, UNL)

Entre los estudios analizados, los mayores porcentajes de germinación fueron reportados en la región sur. En la provincia de Loja, Villacís (2013) registró **81 % de germinación** utilizando turba comercial, correspondiente al valor más alto entre las experiencias consideradas en esta síntesis. Asimismo, una mezcla de **tierra agrícola, arena de mina, cascarilla de arroz y humus**, en proporciones iguales (25 % de cada componente), alcanzó **68 % de germinación**. Estos resultados muestran que ambos sustratos estuvieron asociados con respuestas germinativas favorables bajo las condiciones particulares de los ensayos realizados en Loja, sin que las diferencias observadas puedan atribuirse exclusivamente a la composición del sustrato.

Armijos & Sinche (2013) en su estudio realizado en la Hoya de Loja evaluando la propagación asexual de especies nativas, entre ellas *J. neotropica*, utilizando diferentes sustratos, concluyen que el tipo de sustrato influye significativamente en el enraizamiento y desarrollo inicial de las plántulas, lo cual permitió mejorar la producción de plántulas destinadas a proyectos de restauración forestal.

Región Centro (provincia de Chimborazo – Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ESPOCH)

En el centro andino se obtuvieron resultados intermedios. La mezcla compleja de **turba (40 %), tierra de páramo (20 %), arena (20 %), cascarilla de arroz (20 %), con adición de *Trichoderma* y citoquininas** alcanzó un **68 % de germinación** (Almeida, 2020), porcentaje equiparable al logrado en Loja con un sustrato más simple. Sin embargo, cuando se utilizó la misma mezcla sin adición de bioinsumos, la germinación se redujo a **58,75 %**, lo que resalta la importancia de los bioestimulantes en la mejora del desempeño germinativo. Por otra parte, la combinación de **arena de río (75 %) y hojarasca (25 %)** reportó un valor bajo de **32,1 %** (Guanolema, 2022), lo que indica que los sustratos excesivamente arenosos, con baja capacidad de retención de agua y nutrientes, limitan la germinación.

Región Norte (provincia de Imbabura – Universidad Técnica del Norte, UTN)

En la región norte los valores de germinación fueron marcadamente más bajos. El mejor resultado se obtuvo con la mezcla de **tierra de sitio (50 %), gallinaza (40 %) y pomina (10 %)**, con un **34 % de germinación** (Pambaquishpe, 2023). Las demás combinaciones evaluadas —**tierra de sitio + gallinaza + aserrín** (31 %) y **tierra de sitio + gallinaza + cascarilla de arroz** (31 %) — no superaron el 35 %. Estos resultados reflejan que la gallinaza, aunque aporta nutrientes, puede generar problemas de fitotoxicidad o alterar la microbiota del sustrato cuando se emplea en proporciones elevadas. Asimismo, la textura de la "tierra de sitio", con posible compactación y deficiencias en aireación, pudo limitar la emergencia de plántulas.

Comparación regional

La comparación entre regiones permite establecer una clara gradiente:

- **Sur (Loja–UNL):** mayor éxito germinativo (68–81 %), asociado al uso de turba y mezclas balanceadas con humus.
- **Centro (Chimborazo–ESPOCH):** germinación intermedia (32,1–68 %), destacando la influencia positiva de bioinsumos como *Trichoderma* y citoquininas.
- **Norte (Imbabura–UTN):** germinación baja (31–34 %), posiblemente afectada por el uso de sustratos con elevada proporción de gallinaza y suelos de sitio sin procesos de acondicionamiento.

En términos generales, los resultados evidencian que la **turba comercial y las mezclas con alta proporción de materia orgánica estabilizada (humus) y buena aireación** son las más adecuadas para la germinación de *J. neotropica*. En contraste, los sustratos con predominio de gallinaza o arena muestran bajos porcentajes de éxito.

Las diferencias observadas entre regiones evidencian que la respuesta germinativa de *J. neotropica* depende no solamente de la composición del sustrato, sino también de la interacción entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Los sustratos con elevada porosidad, adecuada retención de humedad y alto contenido de materia orgánica favorecen simultáneamente la imbibición de las semillas, la aireación del embrión y el

desarrollo inicial del sistema radicular, mientras que mezclas excesivamente compactas o con altos contenidos de sales o materia orgánica poco estabilizada pueden limitar estos procesos y reducir significativamente la germinación.

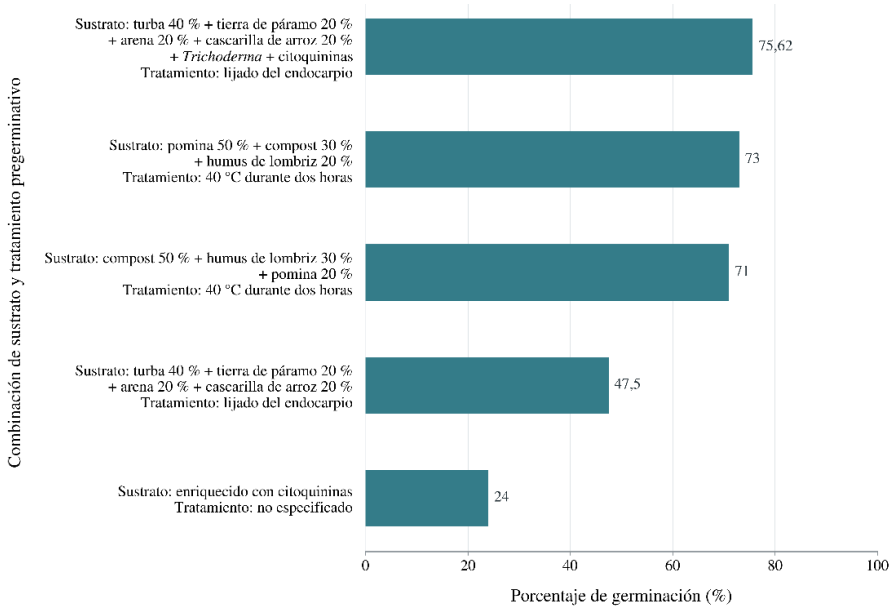
El **sustrato por sí solo** puede superar incluso algunos tratamientos pregerminativos, alcanzando valores de hasta 81 %. Sin embargo, la elección debe considerar no solo el porcentaje de germinación sino la sanidad y uniformidad de plántulas.

8.1.2.2. Germinación según combinaciones de sustrato y tratamiento pregerminativo en J. neotropica

La germinación de *J. neotropica* ha sido evaluada en Ecuador mediante diferentes combinaciones de sustratos y tratamientos pregerminativos. Los resultados reportados por Almeida (2020), Fonseca (2023) y Cué et al. (2024) muestran una amplia variación en los porcentajes de germinación obtenidos bajo las condiciones particulares de cada estudio. Debido a que las investigaciones difieren en procedencia de las semillas, composición de los sustratos, tratamientos aplicados y condiciones experimentales, los resultados deben interpretarse como una comparación entre experiencias y no como evidencia de un efecto de interacción estadística entre ambos factores. La Figura 8.8 sintetiza las principales combinaciones evaluadas y los porcentajes de germinación alcanzados.

Figura 8.8

Porcentaje de germinación de Juglans neotropica según diferentes combinaciones de sustrato y tratamiento pregerminativo



Nota. Elaboración a partir de los resultados reportados por Almeida (2020), Fonseca (2023) y Cué et al. (2024). Los valores corresponden a estudios realizados bajo diferentes condiciones experimentales y deben interpretarse como resultados de las combinaciones evaluadas en cada investigación.

Entre las combinaciones analizadas, el mayor porcentaje de germinación (75,62 %) se registró con un sustrato compuesto por turba (40 %), tierra de páramo (20 %), arena (20 %) y cascarilla de arroz (20 %), enriquecido con *Trichoderma* y citoquininas, en combinación con el lijado de la cubierta leñosa de la nuez (Almeida, 2020). Este resultado identifica la combinación que alcanzó la mayor respuesta germinativa entre las experiencias consideradas en este análisis; sin embargo, no permite atribuir dicho porcentaje a un efecto individual o sinérgico del sustrato, sus componentes o el tratamiento pregerminativo, debido a que estos efectos no fueron evaluados de manera independiente bajo un diseño experimental común.

En un nivel intermedio, el sustrato compuesto por pomina (50 %), compost (30 %) y humus de lombriz (20 %), combinado con un tratamiento de choque térmico (40 °C durante dos horas), registró porcentajes de germinación de 73 % y 71 % en dos ensayos independientes (Cué et al., 2024). Estos resultados indican que la temperatura controlada favorece la imbibición de las semillas y la activación metabólica del embrión, mientras que el sustrato orgánico proporciona condiciones adecuadas para el desarrollo inicial de las plántulas.

En contraste, el mismo sustrato constituido por turba, tierra de páramo, arena y cascarilla de arroz, pero sin la incorporación de bioestimulantes y combinado únicamente con el lijado del endocarpio, redujo la germinación al 47,5 % (Almeida, 2020), evidenciando la importancia de la interacción entre los componentes físicos, biológicos y fisiológicos del sistema de propagación.

Los resultados menos favorables se obtuvieron cuando se utilizó escarificación química con hidróxido de sodio al 4 % durante 32 horas sobre semillas establecidas en un sustrato enriquecido con citoquininas, alcanzándose apenas un 24 % de germinación (Fonseca, 2023). Este comportamiento puede atribuirse al efecto fitotóxico derivado de la exposición prolongada a la solución alcalina, que probablemente afectó no solo el endocarpio sino también la viabilidad del embrión.

Estos resultados obtenidos en Ecuador coinciden con los reportados por Andrade & Torres (2025) en Colombia, quienes concluyeron que la combinación de escarificación mecánica, hormonas promotoras del crecimiento y sustratos orgánicos constituye el protocolo más eficiente para incrementar el porcentaje, la velocidad y la uniformidad de la germinación de *J. neotropica*. La coincidencia entre ambos estudios sugiere que la respuesta germinativa de la especie depende principalmente de la interacción entre tratamientos pregerminativos que faciliten la absorción de agua y sustratos con adecuada aireación, retención de humedad y actividad biológica.

En conjunto, la evidencia disponible muestra que la germinación y la producción de plántulas de J. neotropica responden a múltiples factores, entre ellos las características del sustrato, el tratamiento pregerminativo, la procedencia y calidad de las semillas y las condiciones de vivero. Los resultados comparados permiten identificar alternativas favorables en estudios particulares, pero no justifican asumir una combinación universalmente óptima para la especie. La escarificación química prolongada con soluciones altamente alcalinas requiere especial cautela por los bajos resultados observados y el riesgo de afectar la viabilidad.

8.1.2.3. Recomendaciones técnicas para la selección de sustratos y tratamientos pregerminativos

Los estudios desarrollados en Ecuador y Colombia muestran respuestas variables de *J. neotropica* frente a sustratos y tratamientos pregerminativos. Debido a que proceden de investigaciones realizadas con materiales, diseños y condiciones de vivero diferentes, estas comparaciones deben interpretarse como evidencia complementaria y no como una prueba experimental de superioridad regional o de interacción entre factores. En particular, Cué-García et al. (2024) no encontraron diferencias significativas para la interacción entre sustrato y tratamiento pregerminativo en las variables germinativas analizadas.

Con base en la evidencia científica analizada en este capítulo, los tratamientos físicos, particularmente la lixiviación y la solarización, constituyen las alternativas más recomendables para programas de producción de plantas, debido a su elevada efectividad, bajo costo de implementación y facilidad de aplicación en viveros forestales. De manera complementaria, los tratamientos mecánicos representan una opción eficiente cuando se dispone de personal capacitado, mientras que los tratamientos térmicos ofrecen resultados satisfactorios al combinarse con sustratos orgánicos balanceados.

En cuanto a los sustratos, las mejores respuestas germinativas se obtuvieron con mezclas que presentan alta porosidad, adecuada capacidad de retención de humedad y abundante materia orgánica estabilizada, como la turba comercial o las combinaciones de humus, compost, arena y cascarilla de arroz. Estas características favorecen la aireación, la imbibición de las semillas y el desarrollo inicial del sistema radicular. Por el contrario, los sustratos con elevadas proporciones de gallinaza, aserrín fresco o arena predominante mostraron menores porcentajes de germinación y mayor variabilidad en el establecimiento de las plántulas.

Asimismo, la evidencia disponible demuestra que determinadas interacciones entre tratamientos pregerminativos y sustratos producen efectos sinérgicos que incrementan significativamente la germinación, mientras que otras combinaciones pueden afectar negativamente la viabilidad de las semillas. En particular, la escarificación química prolongada con soluciones altamente alcalinas no se recomienda para *J. neotropica*, debido al riesgo de ocasionar daños en los tejidos embrionarios y reducir el porcentaje de germinación.

En consecuencia, para programas de restauración ecológica, conservación genética, establecimiento de plantaciones forestales y sistemas agroforestales, se recomienda priorizar protocolos de propagación que integren tratamientos pregerminativos físicos o mecánicos con sustratos orgánicos de adecuada estructura física y equilibrio químico. Este enfoque permite maximizar la germinación, favorecer el crecimiento inicial de las plántulas y mejorar la eficiencia de la producción en vivero.

Finalmente, la calidad de una planta no debe evaluarse únicamente a partir del porcentaje de germinación alcanzado. Resulta igualmente indispensable analizar atributos morfológicos y fisiológicos relacionados con el vigor, el desarrollo del sistema radicular y el crecimiento aéreo, ya que estos determinan en gran medida el éxito del establecimiento en campo. Estos aspectos se desarrollan en el siguiente apartado.

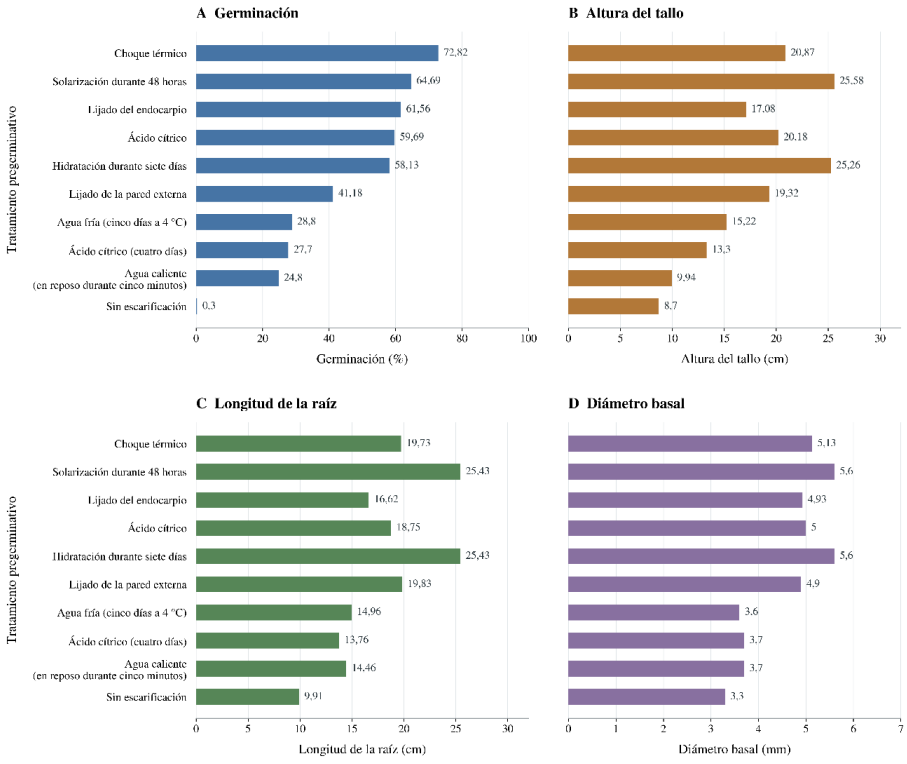
8.1.3. Análisis de variables morfológicas en la producción de plantas de *J. neotropica*

La evaluación de la producción de plantas de *J. neotropica* no debe limitarse al porcentaje de germinación, sino considerar también el crecimiento posterior de las plántulas. Entre las variables morfológicas utilizadas para caracterizar su desarrollo en vivero se encuentran la altura del tallo, el diámetro del cuello y la longitud de la raíz, atributos que proporcionan información complementaria sobre el crecimiento de la parte aérea y del sistema radical (Ritchie et al., 2010; Tsakaldimi et al., 2013).

Almeida (2020) y Guanolema (2022) evaluaron estas variables bajo diferentes combinaciones de tratamientos pregerminativos y sustratos, incluyendo mediciones realizadas a los **90 días**. Ambos estudios muestran respuestas diferenciadas en el crecimiento morfológico de las plántulas según las condiciones experimentales evaluadas. La Figura 8.9 sintetiza los resultados obtenidos para altura del tallo, diámetro y longitud de la raíz a los 90 días, permitiendo comparar las respuestas observadas en ambos estudios.

Figura 8.9

Variables morfológicas de plántulas de Juglans neotropica a los 90 días bajo diferentes tratamientos pregerminativos



Nota. Elaboración a partir de Almeida (2020) y Guanolema (2022). Los valores de altura, longitud de raíz y diámetro corresponden a evaluaciones realizadas a los 90 días. Los resultados proceden de experimentos independientes y representan las medias obtenidas para los tratamientos pregerminativos evaluados en cada estudio.

En conjunto, los resultados muestran que la respuesta de las plántulas varía entre los tratamientos pregerminativos y entre los estudios analizados. Asimismo, el tratamiento que alcanza el mayor porcentaje de germinación no necesariamente presenta los mayores valores en todas las variables morfológicas. Por ello, la evaluación de las alternativas de propagación debe considerar de manera complementaria la germinación y el desarrollo posterior de las plántulas. A continuación, se analizan individualmente la altura del tallo, el desarrollo del sistema radicular y el diámetro basal.

8.1.3.1 Crecimiento aéreo de las plántulas (altura del tallo)

La altura del tallo constituye un indicador ampliamente utilizado para caracterizar el crecimiento inicial de las plántulas, ya que refleja el desarrollo de la parte aérea durante las primeras etapas de producción en vivero. Sin embargo, la altura no debe interpretarse de manera aislada, debido a que un mayor crecimiento longitudinal no necesariamente representa una mejor calidad de planta; su evaluación debe complementarse con atributos como el diámetro del tallo y el desarrollo del sistema radical.

Almeida (2020) señala que los mayores valores de altura a los 90 días se registraron con solarización durante 48 horas (25,58 cm) e hidratación durante siete días (25,26 cm), mientras que el choque térmico y el ácido cítrico alcanzaron 20,87 y 20,18 cm, respectivamente. El lijado presentó el menor valor entre los tratamientos evaluados (17,08 cm). Asimismo, el sustrato enriquecido alcanzó una altura media de 24,72 cm, frente a los 18,86 cm del sustrato no enriquecido.

Guanolema (2022) reportó que la escarificación mecánica mediante lijado presentó la mayor altura media a los 90 días (19,32 cm), seguida por el remojo en agua fría (15,22 cm), mientras que el testigo registró 8,70 cm. La combinación de escarificación mecánica con el sustrato constituido por 75 % de arena de río y 25 % de hojarasca alcanzó 19,90 cm.

En conjunto, los resultados muestran respuestas diferentes entre los dos experimentos. Mientras en Almeida (2020) la solarización y la hidratación presentaron las mayores alturas, en Guanolema (2022) la mayor respuesta correspondió a la escarificación mecánica. Esta variabilidad evidencia que el crecimiento aéreo debe interpretarse en función de las condiciones particulares de cada ensayo, incluyendo el tratamiento pregerminativo y el sustrato utilizado.

8.1.3.2 Desarrollo del sistema radicular

La longitud de la raíz constituye un atributo importante para caracterizar el desarrollo inicial de las plántulas, debido a la función del sistema radical en la exploración del sustrato y en la absorción de agua y nutrientes. Su evaluación en vivero aporta, por tanto, información complementaria a las variables de crecimiento aéreo.

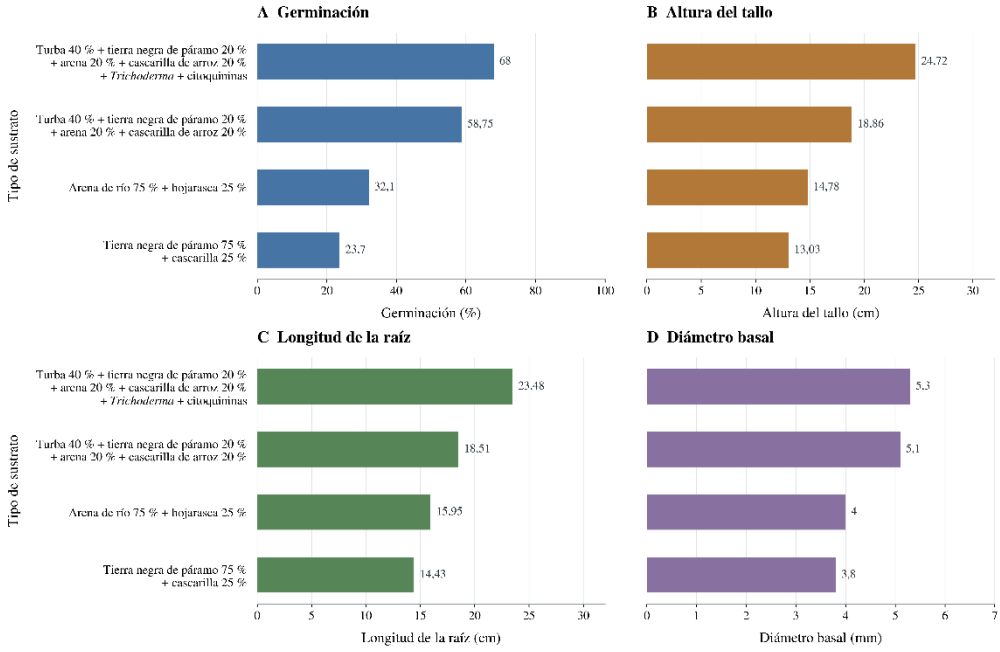
Almeida (2020) determinó que la hidratación durante siete días presentó la mayor longitud radical a los 90 días (25,43 cm), seguida por la solarización durante 48 horas (24,43 cm). El lijado registró el menor valor entre los tratamientos evaluados (16,62 cm). La combinación de sustrato enriquecido e hidratación alcanzó 28,33 cm, mientras que la combinación del mismo sustrato con solarización alcanzó 28,37 cm.

Por otra parte, Guanolema (2022) manifestó que la escarificación mecánica presentó la mayor longitud radical entre los métodos evaluados (19,83 cm), seguida por el remojo en agua fría (14,96 cm), mientras que el testigo registró 9,91 cm. El sustrato constituido por 75 % de arena de río y 25 % de hojarasca alcanzó una longitud radical media de 15,95 cm, superior a la obtenida con tierra negra de páramo y cascarilla.

Los resultados muestran que el desarrollo radical respondió de manera diferente a los tratamientos y sustratos evaluados en cada experimento. Esta variabilidad resalta la importancia de considerar el crecimiento del sistema radical conjuntamente con el desarrollo aéreo al evaluar alternativas para la producción de plantas de *J. neotropica*. La Figura 8.10 sintetiza la respuesta de las principales variables morfológicas de las plántulas a los 90 días en función de los sustratos evaluados en ambos estudios.

Figura 8.10

Variables morfológicas de plántulas de Juglans neotropica a los 90 días según los sustratos evaluados



Nota. Elaboración a partir de los resultados reportados por Almeida (2020) y Guanolema (2022). Los valores proceden de experimentos independientes y corresponden a las condiciones particulares de cada estudio.

8.1.3.3 Robustez estructural de las plántulas (diámetro basal)

El diámetro basal constituye un atributo importante para caracterizar la robustez de las plántulas y complementa la información proporcionada por la altura. Su utilización conjunta con otras variables morfológicas permite una evaluación más integral de la calidad de las plantas producidas en vivero (Thompson, 1985).

Almeida (2020) evidenció que el diámetro a los 90 días varió entre 4,93 mm con lijado y 5,60 mm con hidratación durante siete días; la solarización alcanzó 5,33 mm. Las diferencias entre tratamientos fueron, por tanto, menos pronunciadas que las observadas para la altura y la longitud radical.

Por otro lado, Guanolema (2022) constató que la escarificación mecánica presentó el mayor diámetro medio entre los métodos evaluados (4,90 mm), frente a 3,30 mm en el testigo. La combinación de escarificación mecánica con 75 % de arena de río y 25 % de hojarasca alcanzó 5,60 mm, correspondiente al mayor valor entre las combinaciones evaluadas en ese estudio.

Estos resultados muestran que el diámetro basal también respondió a los tratamientos y sustratos evaluados, aunque con patrones diferentes entre ambos experimentos. Su consideración junto con la altura y el desarrollo radical permite caracterizar con mayor amplitud la morfología de las plántulas producidas.

8.1.3.4 Integración e interpretación de las variables morfológicas

El análisis conjunto de la altura del tallo, la longitud de la raíz y el diámetro basal muestra que la respuesta morfológica de las plántulas de *J. neotropica* varía según los tratamientos pregerminativos y los sustratos evaluados. Los resultados de Almeida (2020) muestran mayores valores de algunas variables con hidratación y solarización, mientras que Guanolema (2022) registró una respuesta favorable de la escarificación mecánica para las tres variables morfológicas consideradas. Estas diferencias indican que no existe, a partir de los estudios analizados, un único tratamiento que pueda considerarse universalmente superior para la producción de plantas.

Asimismo, los resultados muestran que el porcentaje de germinación y el crecimiento posterior de las plántulas no necesariamente presentan el mismo patrón de respuesta. En Almeida (2020), por ejemplo, el mayor porcentaje de germinación correspondió al choque térmico, mientras que los mayores valores de altura, longitud radical y diámetro se registraron con solarización o hidratación. Por ello, la evaluación de los métodos de propagación debe considerar tanto la eficiencia germinativa como los atributos morfológicos de las plantas obtenidas.

Desde una perspectiva de producción en vivero, estos resultados resaltan la conveniencia de evaluar integralmente la germinación, el crecimiento aéreo, el desarrollo radical y el diámetro basal. La selección de tratamientos pregerminativos y sustratos debería considerar el conjunto de estas respuestas, además de aspectos operativos y económicos, y posteriormente validar el desempeño de las plantas mediante evaluaciones de supervivencia y crecimiento después del establecimiento en campo.

8.1.4. Germinación y calidad morfológica como criterios para la evaluación de plántulas de *J. neotropica*

La producción de plántulas forestales de calidad no depende exclusivamente del porcentaje de germinación alcanzado. Aunque la germinación constituye el primer

indicador del éxito de un tratamiento pregerminativo, por sí sola no garantiza la obtención de plantas vigorosas ni un adecuado establecimiento después del trasplante. En especies forestales de crecimiento lento, como *J. neotropica*, la evaluación integral de la calidad de planta requiere considerar simultáneamente indicadores de germinación, crecimiento morfológico y sobrevivencia en vivero (Ritchie et al., 2010; Tsakaldimi et al., 2013).

Los resultados obtenidos en investigaciones desarrolladas en Ecuador (Almeida, 2020; Guanolema, 2022; Ruiz, 2024) permiten analizar la relación existente entre estos indicadores y establecer criterios técnicos para seleccionar los protocolos de propagación más eficientes.

8.1.4.1. La germinación: condición necesaria, pero no suficiente

Los estudios comparados muestran porcentajes de germinación variables según el tratamiento pregerminativo y el tipo de sustrato empleado. En algunos casos, el choque térmico alcanzó valores cercanos al 73 %, mientras que la escarificación mecánica registró aproximadamente 42 % y el ácido cítrico alrededor del 28 %. Analizados de manera aislada, estos resultados podrían sugerir que los tratamientos con mayores porcentajes de germinación son necesariamente los más eficientes.

Sin embargo, la comparación con las variables morfológicas analizadas en el apartado anterior demuestra que esta interpretación resulta incompleta. Diversos tratamientos que presentaron porcentajes de germinación moderados generaron plántulas con mayor desarrollo del sistema radicular, mayor altura y mejor diámetro basal que otros tratamientos con germinaciones superiores. En consecuencia, la germinación constituye una condición indispensable para iniciar el proceso de producción de plantas, pero no representa por sí sola un criterio suficiente para evaluar su calidad.

8.1.4.2. Calidad morfológica como indicador funcional

La calidad de una plántula forestal depende del equilibrio funcional entre sus principales atributos morfológicos y no de una única variable evaluada de forma aislada. En *J. neotropica*, la altura del tallo, la longitud de la raíz y el diámetro basal constituyen indicadores complementarios del vigor inicial, ya que reflejan la capacidad potencial de establecimiento y crecimiento después del trasplante.

Como se analizó en el apartado 8.1.3, los tratamientos de hidratación prolongada y solarización favorecieron simultáneamente el crecimiento aéreo y radicular, mientras que la escarificación mecánica mostró un efecto particularmente favorable sobre el diámetro basal cuando fue combinada con sustratos orgánicos enriquecidos. Estos resultados evidencian que el vigor morfológico depende de la interacción entre el tratamiento pregerminativo y las condiciones físicas, químicas y biológicas del sustrato, más que del porcentaje de germinación considerado de manera independiente.

8.1.4.3. Sobrevivencia como indicador integrador de calidad

La sobrevivencia de las plántulas constituye el resultado integrador del desempeño fisiológico y morfológico alcanzado durante la fase de vivero. Este indicador refleja la capacidad de las plantas para mantener su crecimiento después de la germinación y representa uno de los mejores predictores del éxito del establecimiento en campo.

Las investigaciones desarrolladas con semillas procedentes de las provincias de Napo, Imbabura y Chimborazo (Guanolema, 2022; Ruiz, 2024) registraron porcentajes de sobrevivencia entre 97 y 100 %. La procedencia Pimampiro presentó la mayor sobrevivencia (100 %), mientras que las procedencias de Cuyuja, Natabuela y Riobamba registraron valores entre 97 y 98,33 %.

Estos resultados demuestran la elevada rusticidad de *J. neotropica* y su amplia capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales, características que fortalecen su potencial para programas de restauración ecológica, establecimiento de plantaciones forestales y sistemas agroforestales. No obstante, las diferencias observadas entre procedencias sugieren la influencia conjunta de factores genéticos y ambientales sobre la respuesta de las plántulas, aspecto que resalta la importancia de incorporar criterios de procedencia y variabilidad genética en los programas de producción de plantas (Gutiérrez et al., 2018).

8.1.4.4. Integración de los criterios de calidad de planta

La evidencia analizada demuestra que la evaluación de la calidad de las plántulas de *J. neotropica* debe basarse en la integración de tres criterios complementarios: porcentaje de germinación, calidad morfológica y sobrevivencia en vivero. Ninguno de estos parámetros resulta suficiente por sí solo para predecir el desempeño posterior de las plantas en campo.

En términos generales, los tratamientos que favorecieron una germinación moderada, pero promovieron un adecuado desarrollo del sistema radicular, mayor diámetro basal y elevados porcentajes de sobrevivencia, produjeron plántulas de mejor calidad funcional que aquellos tratamientos que únicamente incrementaron la germinación. Este comportamiento confirma que el vigor morfológico constituye un criterio más robusto para seleccionar protocolos de propagación que el porcentaje de germinación considerado de manera aislada.

En consecuencia, la producción de plantas de *J. neotropica* debe orientarse hacia protocolos que integren tratamientos pregerminativos eficientes, sustratos física y biológicamente adecuados y prácticas de vivero que favorezcan simultáneamente la germinación, el desarrollo equilibrado de las plántulas y su sobrevivencia. Este enfoque permite incrementar la calidad funcional de las plantas y mejorar la probabilidad de éxito durante el establecimiento en programas de restauración ecológica, sistemas agroforestales y plantaciones forestales.

8.1.5. Prácticas culturales de vivero para la producción de plántulas de J. neotropica

La propagación de *J. neotropica*, por semilla, exige un manejo especializado en vivero para obtener plántulas con características óptimas: un sistema radicular profundo y bien estructurado, tallos lignificados y una adecuada capacidad de adaptación a las condiciones de campo.

El éxito en la producción de plántulas no depende exclusivamente del porcentaje de germinación alcanzado, sino de la aplicación integrada de prácticas culturales de vivero que favorezcan el desarrollo fisiológico, morfológico y sanitario de las plantas. Estas prácticas comprenden el manejo de la radiación, el riego, la nutrición, la sanidad, el control de malezas, la poda y el endurecimiento previo al establecimiento en campo, constituyendo la fase final del proceso de propagación sexual de *J. neotropica*.

El manejo de plántulas de *J. neotropica* en vivero requiere la integración de múltiples prácticas que van desde el control de la radiación y el riego, hasta la fertilización, poda y control fitosanitario. La implementación adecuada de estas prácticas asegura la producción de plantas de alta calidad, capaces de establecerse exitosamente en campo y contribuir a los programas de restauración ecológica y reforestación productiva en los Andes. Estas prácticas se basan en principios generales de producción de especies leñosas en contenedor, complementados con experiencias específicas en la propagación de *Juglans* y especies afines.

8.1.5.1. Uso de cobertores y sombra

En los últimos años, los niveles de radiación solar registrados en el Ecuador han superado los rangos considerados permisibles, generando condiciones de alta exposición lumínica y térmica. Este exceso de radiación acelera la pérdida de humedad tanto en el sustrato como en los tejidos de las plantas, lo que incrementa el estrés hídrico y afecta de manera directa el crecimiento y la supervivencia de las plántulas.

Este fenómeno se ha convertido en un factor crítico para el manejo de viveros en zonas de altura, donde las condiciones ambientales ya imponen limitaciones naturales, como las bajas temperaturas, la menor presión atmosférica y la alta variabilidad climática. Frente a este escenario, el uso de cobertores y sombra tiene como propósito principal reducir el estrés ocasionado por el exceso de radiación solar, las temperaturas elevadas y la desecación.

La elección del tipo de cobertura depende de la naturaleza y permanencia del vivero. En viveros temporales o de baja producción anual se emplean coberturas orgánicas, como paja o zarán, que ayudan a conservar la humedad del sustrato, aunque no reemplazan la necesidad de sombra aérea. En cambio, los viveros permanentes suelen implementar coberturas sintéticas, de mayor durabilidad y resistencia.

Durante las primeras 2 a 6 semanas de establecimiento se recomienda el uso de mallas de sombra con un rango de 30–60 %. En ambientes montanos, una sombra ligera

(30–50 %) favorece la adaptación de las plántulas al reducir el riesgo de desecación sin generar etiolación.

En conjunto, el manejo adecuado de la radiación durante las primeras semanas de viverización reduce el estrés fisiológico, favorece el equilibrio hídrico y promueve un crecimiento más uniforme de las plántulas.

8.1.5.2. Manejo del riego

El manejo del riego constituye una de las prácticas más determinantes en la producción de plantas forestales en vivero, debido a su influencia directa sobre el desarrollo del sistema radicular, la fisiología de la plántula y su calidad final para el establecimiento en campo. El principio general del riego en vivero consiste en mantener el sustrato cercano a la capacidad de campo, evitando tanto el encharcamiento prolongado como los periodos de sequía profunda, condiciones que afectan negativamente la aireación del sustrato, la absorción de nutrientes y la sanidad de las plántulas (Bonner, 2008; Landis et al., 2010).

En viveros a cielo abierto, un riego diario suele ser suficiente durante condiciones climáticas normales; sin embargo, en periodos cálidos y secos, característicos de ciertos meses en las zonas interandinas, puede ser necesario incrementar la frecuencia a una o dos aplicaciones diarias. Alternativamente, la implementación de sistemas de riego tecnificado, como goteo o microaspersión con programación automática, permite mejorar la uniformidad de aplicación y optimizar la eficiencia en el uso del agua, reduciendo pérdidas por escorrentía o evaporación (Haase et al., 2016; Landis et al., 2010).

En contenedores con volúmenes de 500 a 1 000 cm^3, comúnmente utilizados en la producción de especies forestales nativas, se recomienda aplicar entre 50 y 200 mL de agua por evento de riego, ajustando el volumen según la textura y capacidad de retención del sustrato, la densidad de raíces y las condiciones microclimáticas del vivero. Es fundamental evitar escurrimientos excesivos, ya que estos pueden provocar lixiviación de nutrientes y afectar el balance nutricional de las plántulas (Grossnickle & South, 2017).

El requerimiento hídrico de las plántulas de *J. neotropica* está condicionado por factores microclimáticos del sitio de viverización, el tipo de sustrato utilizado y, de manera particular, la etapa de desarrollo, desde la germinación y establecimiento inicial hasta la fase de endurecimiento previa al traslado al campo definitivo. Durante la emergencia y establecimiento, es crucial mantener una humedad constante que favorezca la imbibición y el desarrollo inicial del sistema radicular, minimizando el riesgo de enfermedades como el *damping-off*.

En la Tabla 8.3, se muestra que en la fase de crecimiento activo, la demanda hídrica se incrementa como resultado de la expansión foliar y del aumento de la transpiración, mientras que en la etapa de endurecimiento se recomienda una reducción gradual del riego para inducir resistencia fisiológica, mejorar la eficiencia en el uso del agua y preparar las plántulas para las condiciones de estrés hídrico posteriores al trasplante (Grossnickle & South, 2017; Haase et al., 2016).

Tabla 8.3

Requerimiento hídrico estimado por plántula de Juglans neotropica en vivero durante un ciclo de seis meses

Fase de vivero	Duración aproximada	Requerimiento diario mL/plántula	Consumo acumulado por fase (L/plántula)	Consideraciones principales
Emergencia y establecimiento	0-1 mes	50-80	1,5 – 2,4	Mantener humedad constante sin saturación; riesgo de "damping-off".
Crecimiento activo	2-4 meses	100-150	9,0 – 13,5	Mayor demanda hídrica por expansión foliar; evitar déficit que afecte la elongación radicular.
Endurecimiento	5-6 meses	80-120	5,0 – 7,2	Reducción gradual del riego para inducir resistencia fisiológica y preparar el trasplante.
Total, ciclo (≈6 meses)	-	-	15,5–23,1	Consumo referencial del ciclo; debe ajustarse a clima, sustrato, contenedor y sistema de riego.

Nota. Los valores presentados corresponden a estimaciones técnicas basadas en principios fisiológicos y en la literatura especializada sobre manejo del riego y calidad de planta en viveros forestales (Bonner, 2008; Grossnickle & South, 2017; Haase et al., 2016; Landis et al., 2010). Los rangos fueron ajustados considerando las condiciones de viverización de *J. neotropica* en zonas andinas, donde la altitud, la temperatura y las características del sustrato influyen significativamente en la demanda hídrica y en el desempeño inicial de las plántulas.

Por tanto, el manejo del riego debe ajustarse dinámicamente a las condiciones climáticas, al tipo de sustrato y a la etapa de desarrollo de las plántulas, evitando tanto el déficit hídrico como el exceso de humedad, factores que afectan directamente la calidad funcional de la planta.

8.1.5.3. Fertilización

El manejo nutricional en vivero debe orientarse a promover un crecimiento equilibrado de las plántulas, favoreciendo una adecuada lignificación de los tejidos y la formación de un sistema radicular funcional. Dependiendo de la composición y fertilidad inicial del sustrato, puede considerarse la aplicación de fertilizantes de síntesis o la incorporación de enmiendas orgánicas, procurando siempre evitar excesos que comprometan la calidad de planta.

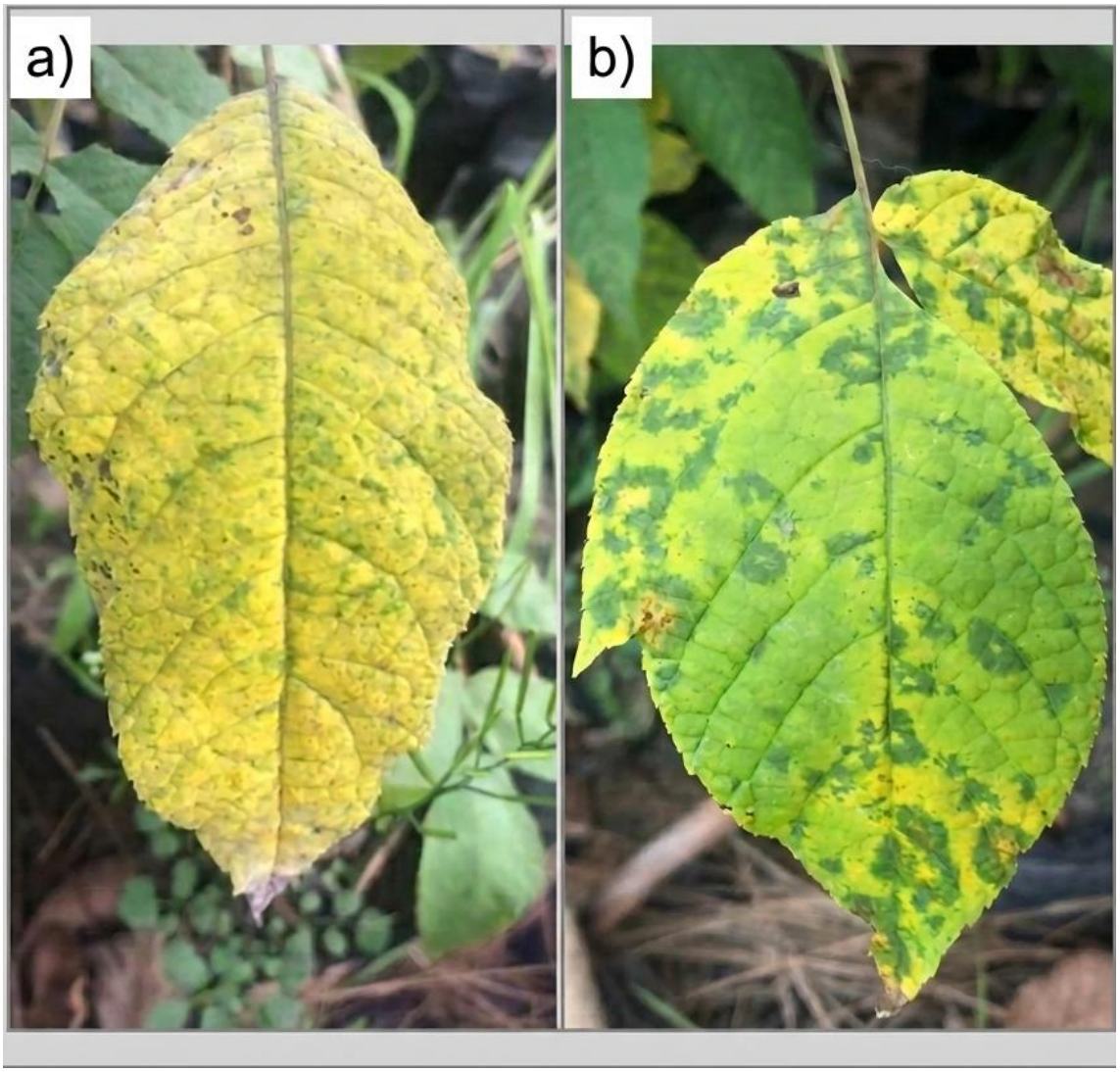
Diversos estudios señalan que, una vez ocurrida la emergencia, las plántulas incrementan significativamente sus demandas nutricionales, particularmente de nitrógeno, fósforo y potasio, nutrientes estrechamente asociados al crecimiento inicial y a la calidad morfológica (Landis et al., 1990). Una nutrición balanceada mejora la eficiencia fisiológica de la planta y se traduce en parámetros de crecimiento favorables,

como mayor diámetro basal, adecuada relación parte aérea/raíz y mejor desempeño posterior en campo.

Las deficiencias nutricionales en el sustrato suelen manifestarse visualmente en la coloración de las hojas como se puede apreciar en la Figura 8.11, clorosis o crecimiento reducido de las plántulas producidas en vivero, lo que constituye un indicador temprano para el ajuste oportuno de los programas de fertilización (Haase, 2008).

Figura 8.11

Manifestaciones visuales de deficiencias nutricionales en hojas de Juglans neotropica en Vivero



Nota. **A)** Clorosis intervenal generalizada, caracterizada por el amarillamiento del limbo y la conservación del color verde de las nervaduras, compatible principalmente con una deficiencia de hierro (Fe). **B)** Necrosis progresiva, caracterizada por el secamiento de los márgenes foliares y la muerte del tejido, compatible principalmente con una deficiencia de potasio (K). Fotografías registradas en el vivero forestal Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte.

Un estudio realizado en la provincia de Chimborazo reportó que las proporciones de nutrientes más eficientes para el crecimiento temprano de plántulas de *J. neotropica* en vivero correspondieron a aplicaciones de **N 50 ppm, P 100 ppm y K 50 ppm**, así como a la combinación **N 50 ppm, P 100 ppm y K 0 ppm**, evidenciando una respuesta positiva a una mayor disponibilidad relativa de fósforo durante las etapas iniciales del desarrollo (Guambo, 2018; Guambo et al., 2020).

Los autores señalan que, bajo estas condiciones, el incremento del nitrógeno se ve potenciado por una adecuada provisión de fósforo, lo que favorece el crecimiento vegetativo temprano y el establecimiento del sistema radicular. En consecuencia, se recomienda aplicar estas soluciones nutritivas con una frecuencia de **cada 10 a 15 días durante las primeras etapas de viverización (0–8 semanas)**. Posteriormente, en fases más avanzadas, se sugiere **incrementar gradualmente las dosis**, priorizando el aporte de **nitrógeno en forma nítrica y potasio**, e incorporar **microelementos** de manera puntual según las deficiencias observadas.

De forma complementaria, el uso controlado de **enmiendas orgánicas**, como compost maduro o guano bien estabilizado, contribuye a mejorar la **estructura física del sustrato**, aumentar la **capacidad de retención de humedad** y favorecer la **actividad microbiana beneficiosa**, aspectos clave para la calidad de planta en vivero.

Diversos estudios han demostrado que *J. neotropica* responde de manera positiva a la fertilización nitrogenada durante la etapa de vivero, particularmente en variables asociadas al crecimiento temprano. La biomasa seca, junto con la altura total de la plántula y el diámetro del cuello, se consideran indicadores confiables del desempeño inicial, ya que reflejan una adecuada asimilación de nitrógeno y una mayor eficiencia fisiológica. En contraste, la deficiencia de nitrógeno suele traducirse en reducciones significativas en todas las variables de crecimiento dasométrico, fenómeno ampliamente documentado en especies forestales debido a la competencia por este nutriente esencial, la cual limita la síntesis de proteínas, clorofila y el desarrollo estructural de la planta (Ramos et al., 2022).

8.1.5.4. Manejo fitosanitario

El manejo fitosanitario de plántulas de *J. neotropica* en vivero debe orientarse prioritariamente hacia un enfoque preventivo o profiláctico, dado que las plantas en etapas tempranas presentan alta susceptibilidad a patógenos y plagas. La prevención incluye el uso de sustratos desinfectados o libres de patógenos, un adecuado drenaje, la rotación de camas o contenedores, el control oportuno de malezas y una correcta gestión del riego, prácticas ampliamente recomendadas en viveros forestales (Agrios, 2005; Landis et al., 2010).

Plagas

Entre las principales plagas asociadas a la fase de viverización se reportan áfidos (Aphididae), mosca blanca (Aleyrodidae) y larvas de insectos que afectan raíces y tallos, las cuales pueden debilitar las plántulas y favorecer infecciones secundarias. Para su manejo se recomienda la implementación de estrategias de manejo integrado de plagas (MIP) que incluyan monitoreo sistemático, conservación de enemigos naturales, uso de

trampas y, únicamente cuando sea necesario, la aplicación racional de productos fitosanitarios registrados, basada en un diagnóstico técnico previo (Altieri & Nicholls, 2004; FAO, 2011).

Enfermedades

En cuanto a enfermedades, las pudriciones radiculares causadas por *Pythium* spp. y *Phytophthora* spp. constituyen los principales problemas sanitarios en vivero, siendo el exceso de humedad y el riego inadecuado los factores predisponentes más relevantes.

Asimismo, durante las evaluaciones realizadas en viveros de la provincia de Imbabura se observaron síntomas foliares compatibles con antracnosis (Figura 8.12). Debido a que estas observaciones no estuvieron acompañadas de aislamiento microbiológico, pruebas de patogenicidad ni análisis moleculares, no corresponde atribuir causalmente los síntomas a un agente específico. En especies del género *Juglans* se han reportado patógenos asociados con cuadros de antracnosis, por lo que la identificación etiológica en J. neotropica requiere confirmación mediante diagnóstico fitopatológico.

Figura 8.12

Síntomas foliares compatibles con un cuadro de antracnosis en plántulas de Juglans neotropica

Nota. Síntomas observados en plántulas de *J. neotropica* en viveros de la provincia de Imbabura. La identificación se basa únicamente en características macroscópicas; no se realizaron análisis microbiológicos, pruebas de patogenicidad ni análisis moleculares para determinar el agente causal.

Los síntomas observados incluyen manchas irregulares de color marrón oscuro a negro, en algunos casos rodeadas por un halo clorótico y distribuidas en el limbo foliar; cuando las lesiones confluyen pueden producir áreas necróticas extensas. Estos signos macroscópicos permiten describir el cuadro sanitario, pero no identificar por sí solos el agente causal. Su manejo debe integrarse con prácticas de nutrición, ventilación, riego y sanidad del vivero (Landis et al., 2010).

Control de malezas

Como parte del manejo fitosanitario preventivo, el control de malezas constituye una práctica fundamental para reducir la competencia por agua, nutrientes y luz, así como para disminuir la presencia de hospederos alternativos de plagas y patógenos. En *J. neotropica*, las malezas representan un factor de competencia directa con las plántulas y pueden afectar la sanidad general del vivero. En Ecuador, las estrategias más utilizadas corresponden al control manual y al uso de coberturas culturales.

- **Control manual:** consiste en la extracción cuidadosa de malezas alrededor de los contenedores, evitando daños a las raíces y al cuello de la plántula.
- **Coberturas culturales:** la aplicación de mulch ligero (paja, viruta de madera u otros materiales orgánicos) en los pasillos disminuye la germinación de malezas y contribuye a conservar la humedad del sustrato. Es fundamental evitar el contacto directo del mulch con el cuello de la plántula para prevenir problemas de pudrición.

8.1.5.5. Poda en vivero

En la fase de viverización de *J. neotropica*, la poda constituye una práctica silvicultural complementaria orientada a mejorar la calidad morfológica y funcional de las plántulas. En vivero se aplican tres tipos principales de poda: poda de formación, poda sanitaria y poda de raíces, las cuales deben ejecutarse de manera oportuna y bajo criterios técnicos definidos (Haase, 2008; Landis et al., 2010).

Poda de formación

Está orientada a la conducción de un eje principal recto, dominante y vigoroso, mediante la eliminación temprana de brotes laterales, bifurcaciones o crecimientos anómalos que comprometan la calidad futura del fuste. Esta práctica favorece una arquitectura aérea equilibrada y una adecuada relación altura–diámetro, parámetros asociados con un mejor desempeño de la planta en campo (Landis et al., 2010; Thompson, 1985).

Poda sanitaria

Consiste en la eliminación de tejidos dañados, necrosados o con síntomas de enfermedades, con el objetivo de reducir fuentes de inóculo y prevenir la diseminación de patógenos dentro del vivero. Esta labor debe realizarse con herramientas limpias y

previamente desinfectadas, como parte de un manejo fitosanitario preventivo integral (Hartmann et al., 2018; Tovar, 2007).

Poda radicular

La poda radicular se aplica con el objetivo de favorecer el desarrollo de un sistema de raíces compacto, fibroso y bien distribuido, evitando deformaciones que afecten el establecimiento y la estabilidad de la plántula en campo. En el contexto de los viveros forestales del Ecuador, esta práctica se realiza principalmente en dos situaciones:

a) **Plántulas producidas a raíz desnuda o con pan de tierra**, donde la poda radicular se efectúa durante el repique o previo al trasplante, mediante el recorte del sistema radicular, especialmente de la raíz pivotante, con el fin de facilitar el manejo y favorecer una arquitectura radicular funcional.

b) **Plántulas producidas en contenedores flexibles (fundas)**, cuando las raíces traspasan el fondo de la funda o se enrollan en su interior. En estos casos, se realiza el corte de las raíces que sobresalen por el fondo de la funda o la poda del ápice radical, con el propósito de evitar raíces deformes, promover la ramificación radicular y mejorar la calidad del cepellón.

En *J. neotropica*, la poda radicular puede emplearse para corregir raíces deformadas o excesivamente elongadas y favorecer un sistema radicular funcional. No obstante, sus efectos sobre absorción, estabilidad y supervivencia deben evaluarse según el tipo de contenedor, la edad de la planta y las condiciones de manejo; por ello, la práctica debe realizarse con cautela y acompañarse de un manejo adecuado del riego y la nutrición (Grossnickle, 2012; Haase, 2008).

8.1.5.6. Lignificación y endurecimiento

El proceso de endurecimiento previo a la plantación definitiva constituye una práctica silvicultural indispensable para garantizar una alta supervivencia y un adecuado desempeño inicial de las plantas en campo. Este manejo debe iniciarse, de forma gradual, entre tres y seis semanas antes de la salida del vivero y comprende la reducción progresiva de la fertilización nitrogenada y de la frecuencia de riego, así como el incremento controlado de la exposición a radiación solar y viento mediante la retirada parcial de mallas de sombreo (Landis et al., 1990; Mexal & Landis, 1990).

La disminución del nitrógeno favorece la lignificación de los tejidos, reduce el crecimiento excesivamente tierno y promueve una mayor resistencia al estrés hídrico y mecánico tras la plantación. Paralelamente, la restricción hídrica moderada estimula el desarrollo de tejidos más compactos y funcionales, sin inducir daños fisiológicos cuando se aplica de manera controlada (Duryea & Landis, 1984; Thompson, 1985).

Los principales indicadores de calidad de planta incluyen un tallo bien lignificado, con coloración oscura en la porción basal, un sistema radicular profundo, bien ramificado y sin enrollamiento, así como la ausencia de síntomas de plagas o enfermedades. Estas

características morfofisiológicas están estrechamente asociadas con una mayor tolerancia al estrés post-plantación y con un establecimiento más exitoso en condiciones de campo (Landis et al., 2010; Ritchie, 1984).

El endurecimiento constituye la etapa final del proceso de viverización y representa la transición entre las condiciones controladas del vivero y el ambiente donde las plantas serán establecidas definitivamente. Su adecuada aplicación incrementa significativamente la supervivencia inicial y el crecimiento durante los primeros meses posteriores a la plantación.

La producción de plantas de calidad de *J. neotropica* constituye un proceso continuo en el que intervienen factores genéticos, fisiológicos, tecnológicos y de manejo. Desde la selección de árboles semilleros y frutos hasta el endurecimiento previo a la plantación, cada etapa condiciona la calidad funcional de las plántulas y su capacidad de establecimiento en campo.

La evidencia científica presentada en esta sección demuestra que la producción exitosa de plantas depende de la integración de semillas de calidad, tratamientos pregerminativos adecuados, sustratos física y biológicamente equilibrados, prácticas culturales de vivero y criterios de evaluación basados en indicadores morfológicos y fisiológicos. La aplicación conjunta de estos componentes permite maximizar la eficiencia de los viveros forestales y mejorar el establecimiento de plantaciones, programas de restauración ecológica y sistemas agroforestales con *J. neotropica*. La Figura 8.13 sintetiza este proceso integral de propagación sexual, mostrando la secuencia de etapas y la interacción de los principales factores que determinan la producción de plantas de calidad para su establecimiento en campo.

Figura 8.13

Proceso integrado para la producción de plantas mediante propagación sexual de Juglans neotropica

Nota. La figura presenta las etapas de producción, desde la selección de árboles semilleros hasta la obtención de plantas listas para establecerse en campo, así como los factores que influyen en su calidad y desempeño inicial. Fotografía final: Mediavilla (2023).

8.2. Propagación asexual de *J. neotropica*

La propagación asexual de *J. neotropica* representa una alternativa complementaria a la producción de plantas mediante semillas y ofrece posibilidades para multiplicar material vegetal seleccionado y conservar características de interés. Sin embargo, su aplicación en la especie es todavía limitada y enfrenta dificultades relacionadas con la capacidad de enraizamiento, la edad fisiológica del material vegetal y la respuesta diferencial de los genotipos. En esta sección se presentan los fundamentos de la propagación vegetativa y se analizan las principales técnicas estudiadas o potencialmente aplicables a *J. neotropica*, con énfasis en su utilidad para la conservación, domesticación y mejoramiento de la especie.

8.2.1. Fundamentos biológicos y aplicaciones de la propagación vegetativa

La propagación vegetativa comprende el conjunto de técnicas que permiten obtener nuevos individuos a partir de tejidos, órganos o estructuras vegetativas de una planta madre, conservando íntegramente su constitución genética. A diferencia de la propagación sexual, donde ocurre recombinación genética, la propagación asexual produce clones, es decir, individuos genéticamente idénticos al árbol del cual procede el material vegetal (Hartmann et al., 2018).

En especies forestales, la propagación vegetativa constituye una herramienta fundamental para conservar genotipos superiores, establecer huertos semilleros clonales, acelerar programas de mejoramiento genético y multiplicar individuos con características sobresalientes de crecimiento, calidad del fuste, producción de frutos o resistencia a plagas y enfermedades (Leakey, 2014; Wendling et al., 2014).

Su importancia adquiere especial relevancia en especies nativas cuya regeneración natural presenta limitaciones derivadas de la baja disponibilidad de semillas viables, la fructificación irregular, la pérdida de árboles semilleros o la presencia de mecanismos de dormancia que dificultan la producción masiva de plantas mediante semillas (Bonner et al., 2008; Hartmann et al., 2018).

En el caso de *J. neotropica*, estas condiciones se manifiestan en la producción irregular de frutos, la rápida pérdida de viabilidad de las semillas durante el almacenamiento y la disminución progresiva de poblaciones naturales ocasionada por el aprovechamiento selectivo de individuos de alto valor maderable. En consecuencia, la propagación vegetativa representa una estrategia complementaria a la propagación sexual para conservar recursos genéticos, multiplicar árboles sobresalientes y producir material vegetal uniforme destinado a programas de restauración ecológica, sistemas agroforestales y plantaciones forestales.

Actualmente, las investigaciones desarrolladas en Ecuador se han concentrado principalmente en dos métodos: el enraizamiento de estacas y la injertación, mientras que la micropropagación mediante cultivo de tejidos constituye una línea de investigación aún emergente, cuyo potencial se analiza en el siguiente apartado.

8.2.2. Propagación vegetativa mediante enraizamiento de estacas

El enraizamiento de estacas constituye una de las técnicas más utilizadas para la propagación vegetativa de especies forestales, debido a su relativa simplicidad operativa y a la posibilidad de obtener un elevado número de plantas clonales a partir de árboles seleccionados. El método consiste en inducir la formación de raíces adventicias en segmentos de tallo o ramas juveniles mediante el empleo de reguladores de crecimiento y condiciones ambientales controladas (Hartmann et al., 2018).

En el ámbito de la silvicultura tropical, el desarrollo de protocolos estandarizados para especies nativas leñosas demuestra que el éxito del prendimiento depende de la

optimización de los factores mecánicos y hormonales en el sustrato, sirviendo de base metodológica para el manejo de germoplasma forestal de difícil enraizamiento (Mesén et al., 2001).

En *J. neotropica*, Romero-Flores (2025) evaluó en el Campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte la respuesta de 300 estacas sometidas a diferentes tratamientos con auxinas. Se analizaron variables relacionadas con el prendimiento, formación de raíces, brotación, sobrevivencia y estado fitosanitario durante un período de seis meses.

Los resultados mostraron una capacidad de enraizamiento muy reducida, con un máximo de 1,66 % de prendimiento en los tratamientos con auxinas. Este valor confirma que, bajo las condiciones evaluadas, el método no alcanza todavía una eficiencia suficiente para su aplicación operativa en vivero, aunque registra la formación ocasional de raíces adventicias.

Desde el punto de vista fisiológico, la limitada respuesta observada puede atribuirse al elevado grado de lignificación de los tejidos, a la edad fisiológica del material vegetal y a la reducida capacidad rizogénica característica de muchas especies leñosas pertenecientes a la familia Juglandaceae. Este comportamiento es consistente con los fundamentos fisiológicos de la reproducción vegetativa expuestos por Leakey (2004), quien asocia las dificultades de enraizamiento en géneros recalcitrantes con limitaciones en el transporte de auxinas endógenas y la rápida oxidación fenólica de los tejidos maduros. Diversos estudios indican que el éxito del enraizamiento depende estrechamente del estado juvenil del material vegetal, la concentración de auxinas, la época de colecta, el control de la humedad relativa y la temperatura del ambiente de propagación (Hartmann et al., 2018; Leakey, 2014; Wendling et al., 2014).

En consecuencia, el enraizamiento de estacas debe considerarse actualmente una línea experimental que requiere optimización antes de recomendarse para la producción de *J. neotropica.* Entre los factores que podrían evaluarse en futuras investigaciones se encuentran la juvenilidad del material, el ambiente de propagación, el tipo de sustrato y el manejo de reguladores de crecimiento.

8.2.3. Injertación como estrategia de propagación clonal

La injertación constituye una de las técnicas más importantes de propagación vegetativa en especies forestales y frutales, ya que permite combinar las ventajas de un patrón adaptado a determinadas condiciones edáficas o ambientales con un vástago procedente de un árbol genéticamente superior. El resultado es un individuo clonal que conserva las características deseables del árbol donante, manteniendo simultáneamente la capacidad de adaptación conferida por el patrón (Hartmann et al., 2018).

En especies del género *Juglans*, la injertación ha sido ampliamente utilizada para establecer huertos semilleros clonales, bancos de germoplasma y plantaciones destinadas a la producción de madera y frutos de alta calidad. Su principal ventaja radica en la

posibilidad de multiplicar individuos sobresalientes conservando íntegramente su constitución genética, aspecto fundamental en programas de mejoramiento genético y conservación ex situ (Leakey, 2014; Wendling et al., 2014).

En Ecuador, las investigaciones desarrolladas sobre injertación en *J. neotropica* han permitido identificar los principales factores que condicionan el éxito de esta técnica, entre ellos la procedencia del material vegetal, el tipo de injerto, la compatibilidad fisiológica entre patrón y vástago y las condiciones de manejo durante la fase de prendimiento.

Márquez (2024), en la Hacienda La Florencia (Loja), evaluó el prendimiento de injertos elaborados con vástagos procedentes del Parque Universitario Francisco Vivar Castro y de la localidad de El Zañe, empleando como patrones plántulas locales de *J. neotropica*. Después de sesenta días, el material procedente del Parque Universitario alcanzó un prendimiento del 5,33 %, mientras que los injertos provenientes de El Zañe no registraron prendimiento.

Aunque los porcentajes obtenidos fueron bajos, los resultados evidencian que la procedencia del material vegetal influye directamente sobre la compatibilidad fisiológica entre patrón y vástago. Diferencias en el grado de madurez de los tejidos, el diámetro de los materiales y la sincronización del crecimiento cambial pueden limitar la formación del callo de unión y la posterior conexión vascular, reduciendo significativamente el éxito del injerto (Hartmann et al., 2018).

Resultados complementarios fueron obtenidos por Chimbolema (2021) en la Estación Experimental Tunshi de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, donde se compararon tres técnicas de injertación (púa lateral, púa terminal y corte omega) utilizando cuatro progenies de *J. neotropica*. El estudio demostró diferencias significativas entre los métodos evaluados, destacándose la púa lateral y el corte omega por presentar mayores porcentajes de prendimiento y mejor desarrollo inicial de los brotes.

Desde una perspectiva fisiológica, estos resultados indican que la calidad de la unión vascular depende principalmente del contacto adecuado entre los tejidos cambiales del patrón y del vástago. Cuando este contacto se establece de forma eficiente, se inicia la formación de tejido calloso, seguido de la diferenciación de nuevos vasos conductores que restablecen el flujo de agua, nutrientes y fotoasimilados entre ambas estructuras. Por el contrario, pequeñas diferencias en diámetro, desecación de las superficies de corte o incompatibilidades fisiológicas pueden impedir la formación de esta continuidad vascular y provocar el fracaso del injerto.

En conjunto, las investigaciones desarrolladas en Ecuador muestran que la injertación constituye actualmente la técnica de propagación vegetativa con mayor potencial para la multiplicación clonal de *J. neotropica*. No obstante, su aplicación a escala operativa requiere optimizar aspectos relacionados con la selección de patrones

juveniles, la procedencia del material vegetal, la época de injertación y el manejo ambiental durante el período de cicatrización.

8.2.4. Comparación técnica e interpretación de los métodos de propagación vegetativa

Las investigaciones desarrolladas hasta la fecha evidencian que ninguna de las técnicas de propagación vegetativa evaluadas en *J. neotropica* constituye por sí sola una solución universal para la producción de plantas. Por el contrario, cada método presenta ventajas, limitaciones y aplicaciones específicas que dependen de los objetivos del programa de propagación.

El enraizamiento de estacas representa la alternativa más sencilla desde el punto de vista operativo y puede facilitar la multiplicación masiva de material vegetal cuando se logren optimizar los procesos de rizogénesis. Sin embargo, la baja capacidad natural de enraizamiento observada en la especie limita actualmente su utilización práctica.

La injertación, en cambio, presenta un mayor potencial para conservar y multiplicar genotipos superiores, ya que permite reproducir individuos seleccionados manteniendo íntegramente sus características genéticas. Aunque requiere mayor especialización técnica, constituye actualmente la herramienta más prometedora para programas de mejoramiento genético, establecimiento de huertos semilleros clonales y conservación de recursos genéticos.

Finalmente, la micropropagación mediante cultivo de tejidos representa una alternativa de alto potencial científico, al permitir la producción rápida de plantas libres de patógenos y la conservación de germoplasma bajo condiciones controladas. No obstante, debido a sus mayores requerimientos tecnológicos y económicos, esta técnica aún se encuentra en una fase inicial de investigación para *J. neotropica*.

En consecuencia, la propagación vegetativa de *J. neotropica* debe entenderse como un conjunto de estrategias complementarias más que como técnicas excluyentes. La selección del método dependerá del objetivo de propagación, la disponibilidad de infraestructura, el nivel tecnológico del vivero y el tipo de material vegetal que se pretenda conservar o multiplicar. Con el propósito de sintetizar las principales características, ventajas, limitaciones y aplicaciones de las técnicas evaluadas para la especie, la Tabla 8.4 presenta una comparación técnica de los métodos de propagación vegetativa utilizados en *J. neotropica***.**

Tabla 8.4

Comparación técnica de los métodos de propagación vegetativa evaluados para Juglans neotropica

Método	Principio biológico	Ventajas	Limitaciones	Estado actual en Ecuador	Aplicación potencial
Enraizamiento de estacas	-Formación de raíces adventicias inducidas por auxinas.	-Conserva el genotipo. -Técnica sencilla. -Bajo costo.	-Muy bajo porcentaje de enraizamiento. -Alta dependencia del estado juvenil.	Experimental.	-Bajo en las condiciones evaluadas.
Injertación	-Unión vascular entre patrón y vástago.	-Conserva íntegramente el genotipo. -Mayor potencial de prendimiento. -Permite establecer huertos clonales.	-Requiere alta especialización. -Compatibilidad patrón–vástago.	Experimental.	-Potencial sujeto a validación.
Micropropagación	-Organogénesis o embriogénesis in vitro.	-Alta tasa de multiplicación. -Plantas libres de patógenos. -Conservación *ex situ.*	-Alto costo Infraestructura especializada. -Protocolos aún en desarrollo.	Investigación en desarrollo.	-Potencial tecnológico; requiere optimización.

Nota. La clasificación resume el estado de la evidencia disponible para *J. neotropica* en Ecuador. No constituye una escala de recomendación operativa: el enraizamiento de estacas presenta eficiencia muy baja bajo las condiciones evaluadas; la injertación requiere mayor validación; y la micropropagación continúa en desarrollo. La selección de cada método debe considerar el objetivo, la infraestructura y la evidencia experimental disponible (Hartmann et al., 2018; Leakey, 2014; Wendling et al., 2014).

8.3. Micropropagación y cultivo de tejidos de *J. neotropica*

La propagación in vitro constituye una línea emergente para *J. neotropica*, con potencial para complementar los métodos de propagación sexual y vegetativa convencional descritos anteriormente. Aunque los protocolos específicos para la especie aún son limitados, los avances obtenidos en otras especies del género *Juglans* proporcionan fundamentos biológicos y metodológicos que pueden orientar el desarrollo de técnicas de cultivo de tejidos aplicables al nogal andino. En esta sección se presentan los principios de la micropropagación, sus principales etapas y limitaciones, así como los avances y perspectivas para su aplicación en *J. neotropica*.

8.3.1. Fundamentos biológicos de la micropropagación

La micropropagación constituye una de las aplicaciones más avanzadas de la biotecnología vegetal para la propagación clonal de especies forestales. Su fundamento radica en el principio de la **totipotencia celular**, según el cual una célula vegetal conserva la capacidad de regenerar un organismo completo cuando se cultiva bajo condiciones adecuadas de nutrición, regulación hormonal y ambiente estéril (George et al., 2008; Hartmann et al., 2018).

En especies del género *Juglans*, la micropropagación representa una alternativa estratégica frente a las limitaciones de los métodos convencionales de propagación vegetativa, como el enraizamiento de estacas y la injertación, cuyos resultados dependen del genotipo, la edad fisiológica del material vegetal y las condiciones ambientales. Además de permitir la multiplicación rápida de individuos seleccionados, esta técnica facilita la obtención de plantas genéticamente uniformes, libres de patógenos y aptas para programas de conservación genética, restauración ecológica, establecimiento de huertos clonales y mejoramiento forestal.

No obstante, el cultivo de tejidos en nogal presenta importantes desafíos biológicos, entre ellos la oxidación de compuestos fenólicos liberados por los explantes, la contaminación microbiana, la hiperhidricidad, el reducido enraizamiento y la difícil aclimatación de las vitroplantas. Para superar estas limitaciones se han optimizado medios de cultivo como el medio DKW (Driver y Kuniyuki), reguladores de crecimiento —principalmente 6-bencilaminopurina (BAP), thidiazuron (TDZ), meta-topolina y ácido indolbutírico (IBA)—, además del empleo de antioxidantes como ácido ascórbico, carbón activado y polivinilpirrolidona. Más recientemente, tecnologías como los sistemas de inmersión temporal, la iluminación LED y herramientas de modelado predictivo han incrementado la eficiencia de los protocolos de regeneración y multiplicación in vitro en especies del género *Juglans* (Deepika et al., 2026).

8.3.2. Desarrollo de la micropropagación de *J. neotropica* en Ecuador

Las investigaciones desarrolladas en Ecuador se han orientado principalmente hacia la optimización de sistemas de cultivo in vitro que permitan incrementar la eficiencia de multiplicación y mejorar la calidad fisiológica de las vitroplantas. Entre las tecnologías evaluadas destacan los **biorreactores de inmersión temporal (BIT)**, los cuales representan una evolución de los sistemas tradicionales de cultivo en medio semisólido.

A diferencia de los medios sólidos convencionales, los BIT permiten que los explantes entren en contacto con el medio nutritivo únicamente durante intervalos programados, favoreciendo una mejor aireación de los tejidos, una absorción más eficiente de nutrientes y una reducción del exceso de humedad responsable de la hiperhidricidad.

En el laboratorio de cultivo de tejidos vegetales de la Universidad de Cuenca, Rocano (2017) evaluó la eficiencia de los biorreactores de inmersión temporal utilizando embriones cigóticos maduros de *J. neotropica* procedentes de la provincia del Azuay. Los explantes fueron cultivados en medio DKW suplementado con BAP e IBA, comparando

el sistema tradicional en medio semisólido con diferentes frecuencias de inmersión (6, 8 y 12 horas), con y sin ventilación forzada.

Rocano et al. (2017) no detectaron diferencias estadísticas globales entre el sistema BIT y el cultivo semisólido para las variables de crecimiento evaluadas. En términos generales, ambos sistemas produjeron plantas de características semejantes; sin embargo, los BIT generaron más brotes, la ventilación forzada redujo la hiperhidricidad y el sistema presentó un menor costo medio de producción. Estos resultados muestran ventajas operativas específicas de los BIT, pero no sustentan afirmar una superioridad significativa general sobre el sistema semisólido.

De manera complementaria, Peña et al. (2014) evaluaron la respuesta de semillas de *J. neotropica* cultivadas in vitro utilizando diferentes concentraciones de BAP y TDZ. Los tratamientos con BAP promovieron una mayor inducción de brotes respecto al TDZ, confirmando la elevada sensibilidad de la especie a este regulador de crecimiento y su utilidad para protocolos de multiplicación clonal.

8.3.3. Avances regionales y perspectivas para la micropropagación

Los avances alcanzados en Ecuador pueden complementarse con investigaciones desarrolladas en otros países andinos. En Colombia, Quintero-García & Jaramillo-Villegas (2012) demostraron que embriones inmaduros procedentes de frutos con aproximadamente veinte semanas de desarrollo alcanzaron porcentajes de germinación del 100 % en medios MS, WPM y DKW, siendo el medio MS el que produjo plántulas de mejor desarrollo morfológico y permitió reducir entre dos y tres meses el tiempo requerido para el establecimiento in vitro.

La comparación entre ambos enfoques evidencia que las investigaciones desarrolladas en Ecuador y Colombia abordan etapas diferentes, pero complementarias, del proceso de micropropagación. Mientras los estudios ecuatorianos se han concentrado en optimizar la fase de multiplicación mediante biorreactores de inmersión temporal, los trabajos colombianos han fortalecido la etapa inicial de establecimiento utilizando embriones inmaduros como explantes. En conjunto, ambas líneas de investigación contribuyen al desarrollo de protocolos más eficientes para la propagación clonal de *J. neotropica*.

Desde una perspectiva biotecnológica, los sistemas de inmersión temporal representan una de las tecnologías con mayor potencial para la producción masiva de plantas forestales, debido a que reducen los costos de producción, disminuyen la manipulación manual de los cultivos y permiten automatizar parcialmente los procesos de multiplicación. No obstante, para consolidar su aplicación en *J. neotropica* aún resulta necesario optimizar las fases de enraizamiento, aclimatación y transferencia a vivero, además de validar protocolos específicos para diferentes procedencias y genotipos de la especie.

La evidencia científica disponible demuestra que la propagación de *J. neotropica* ha evolucionado desde métodos convencionales basados en semillas hasta estrategias biotecnológicas de alta complejidad orientadas a la conservación y multiplicación clonal de individuos superiores. La propagación sexual continúa siendo la alternativa más

apropiada para la producción masiva de plantas y la conservación de la diversidad genética, mientras que la propagación vegetativa y la micropropagación ofrecen herramientas complementarias para el mejoramiento genético, la conservación de germoplasma y la obtención de material vegetal uniforme.

La Figura 8.14 sintetiza esta evolución tecnológica e integra las principales estrategias de propagación desarrolladas para *J. neotropica*, destacando la contribución específica de cada una y su papel complementario en la producción de plantas destinadas a programas de restauración ecológica, manejo forestal sostenible, establecimiento de plantaciones, sistemas agroforestales y conservación genética.

Figura 8.14

Estrategias de propagación de Juglans neotropica: desde la propagación sexual hasta la micropropagación

Nota. La figura integra las estrategias de propagación desarrolladas para *J. neotropica*, desde la propagación sexual hasta la micropropagación, destacando la contribución específica de cada una para la producción de plantas de alta calidad y su aplicación en la conservación, el manejo sostenible y el aprovechamiento responsable de la especie.

En conjunto, las estrategias de propagación descritas constituyen el fundamento biológico y tecnológico para la conservación, el manejo y el aprovechamiento sostenible de *J. neotropica*. La integración de métodos convencionales, técnicas de propagación clonal y herramientas biotecnológicas amplía las posibilidades de producir material vegetal de alta calidad, fortaleciendo las iniciativas de restauración ecológica, conservación de recursos genéticos y desarrollo de sistemas productivos sostenibles en los Andes ecuatorianos.

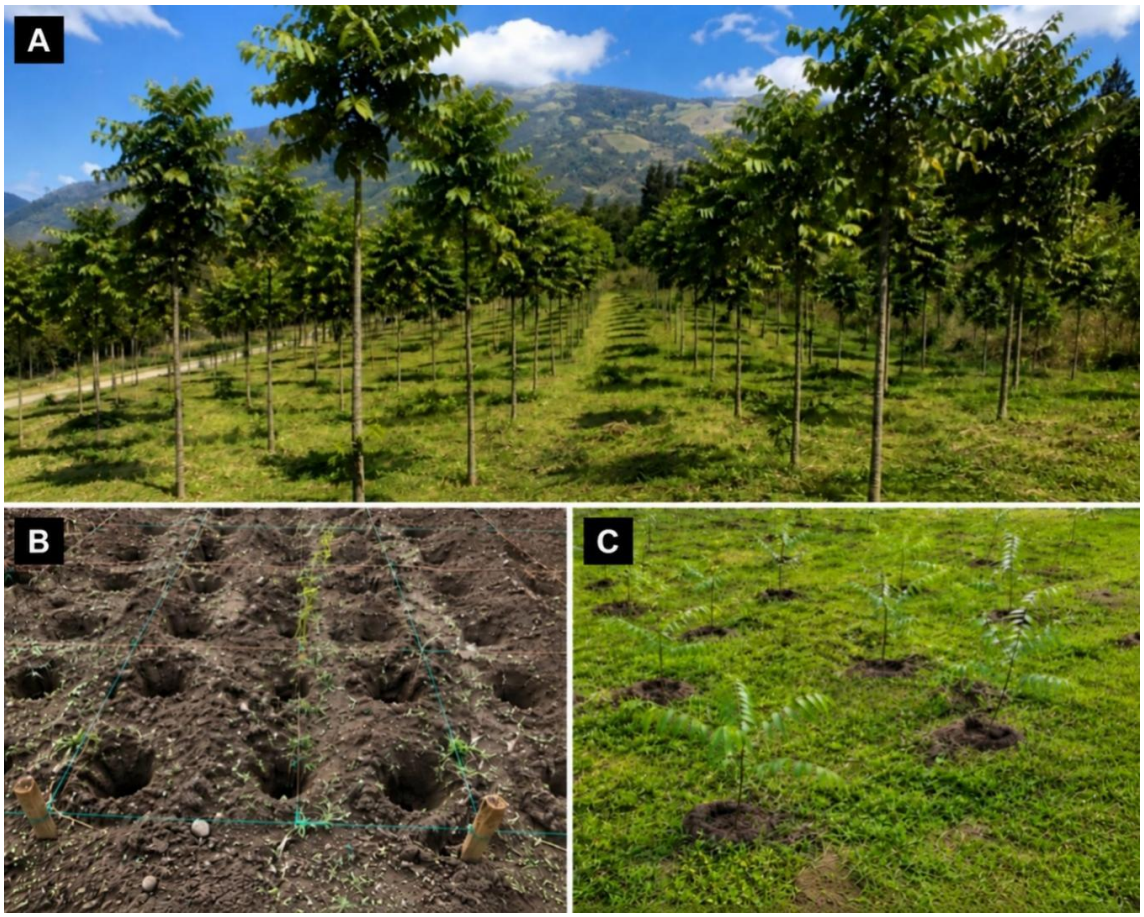
CAPÍTULO 9

Plantaciones forestales de *Juglans neotropica*

Capítulo

9

Plantaciones forestales de *Juglans neotropica*



A) Plantación de *J. neotropica* establecida con fines de mejoramiento genético en Yuyucocha, Ibarra, Imbabura. **B)** Hoyado para el establecimiento de una plantación con fines de restauración en Yuyucocha, Ibarra, Imbabura. **C)** Plantación de *J. neotropica* establecida con fines comerciales en La Favorita, Santo Domingo de los Tsáchilas. Ecuador. Fotografías A y B: Mario Añazco; fotografía C: Hugo Vallejos.

El establecimiento de plantaciones forestales constituye una de las principales alternativas para integrar la conservación, producción y manejo sostenible de *J. neotropica* en los paisajes andinos del Ecuador. Debido a su condición de especie nativa y a su valor maderable, alimentario, ecológico y cultural, el nogal andino puede incorporarse en plantaciones con objetivos diversos, que incluyen la producción de madera y productos forestales no madereros, la conservación y el mejoramiento de recursos genéticos, la restauración de ecosistemas degradados, el enriquecimiento de bosques secundarios y la conformación del arbolado urbano y periurbano.

El éxito de estas plantaciones depende de la correspondencia entre el objetivo de establecimiento, las condiciones ecológicas del sitio, la calidad del material vegetal y la aplicación de prácticas silviculturales apropiadas durante las fases de establecimiento y desarrollo inicial. En este contexto, el empleo de material vegetal con adecuada calidad genética y morfológica, conjuntamente con prácticas técnicamente sustentadas antes, durante y después de la plantación, constituye un componente fundamental para alcanzar los objetivos productivos, ecológicos o de conservación definidos para cada intervención (Aguirre et al., 2001; FAO, 2014).

En Ecuador se dispone de experiencias de establecimiento de *J. neotropica* bajo diferentes modalidades y condiciones ambientales. Estas experiencias incluyen plantaciones comerciales, ensayos de procedencias y progenies, intervenciones de restauración ecológica, plantaciones de enriquecimiento y árboles establecidos en espacios urbanos. En conjunto, constituyen una base empírica relevante para analizar la silvicultura de plantaciones de la especie y para diferenciar los diseños y objetivos que deben orientar su establecimiento.

En este capítulo se describen, en primer lugar, las principales tipologías de plantación documentadas para *J. neotropica* en Ecuador, enfatizando su finalidad, estructura y configuración espacial. Posteriormente, se abordan de manera integrada las técnicas de establecimiento y las prácticas silviculturales requeridas durante la fase inicial de las plantaciones. De esta manera, se evita la reiteración de procedimientos técnicos entre las diferentes modalidades y se establece una secuencia conceptual que diferencia el tipo y diseño de la plantación de las operaciones silviculturales necesarias para su establecimiento y manejo.

9.1. Tipos de plantaciones forestales con *J. neotropica*

En Ecuador, *J. neotropica* ha sido incorporada en diferentes modalidades de plantación como respuesta a objetivos productivos, de investigación, conservación, restauración y provisión de servicios ecosistémicos. En el contexto de este capítulo se reconocen cinco modalidades principales: plantaciones con fines comerciales; plantaciones estratégicas para la conservación y el mejoramiento genético; plantaciones destinadas a la restauración ecológica; plantaciones de enriquecimiento en bosques secundarios; y plantaciones asociadas al arbolado urbano y periurbano.

La diferenciación entre estas modalidades responde fundamentalmente al objetivo de establecimiento y al arreglo estructural y espacial adoptado. Las operaciones relacionadas con selección del sitio, preparación del terreno, acondicionamiento del micrositio, características del material vegetal, apertura de hoyos, fertilización, plantación

y manejo posterior son comunes, con diferentes grados de intensidad, a varias de estas modalidades y, por tanto, se desarrollan de manera integrada en las secciones posteriores.

9.1.1. Plantaciones con fines comerciales

Las plantaciones comerciales de *J. neotropica* constituyen una alternativa para la producción sostenible de bienes forestales de alto valor en la región andina ecuatoriana. La especie presenta aptitud para la producción de madera y, simultáneamente, potencial para la obtención de productos forestales no madereros, entre ellos frutos comestibles y materias primas susceptibles de aprovechamiento para diferentes cadenas de valor. Esta condición permite que las plantaciones comerciales sean concebidas bajo un enfoque multipropósito, en concordancia con los procesos de domesticación y valorización de especies arbóreas nativas (Añazco et al., 2019; Leakey, 2012; Simons & Leakey, 2004).

Desde el punto de vista estructural, estas plantaciones se caracterizan por el establecimiento regular de individuos en superficies continuas o bloques, con densidades definidas en función del producto principal esperado. Cuando el objetivo predominante corresponde a la producción de madera, pueden utilizarse espaciamientos de **4 × 4 m a 5 × 5 m**, equivalentes aproximadamente a **625 y 400 árboles ha^{-1}**, respectivamente. Estos arreglos permiten mantener una competencia inicial suficiente entre individuos y orientar posteriormente el manejo hacia la conformación de fustes de calidad.

Cuando el objetivo incorpora de manera relevante la producción de frutos, el diseño puede contemplar espaciamientos mayores, como **6 × 6 m o 7 × 7 m**, con el propósito de proporcionar mayor espacio para el desarrollo lateral de las copas y facilitar el acceso para las actividades de manejo y cosecha. En terrenos con topografía irregular, el arreglo espacial puede ajustarse a las curvas de nivel y a las características particulares del sitio (FAO, 2014).

La orientación comercial de estas plantaciones no implica necesariamente un aprovechamiento exclusivamente maderero. El carácter multipropósito de *J. neotropica* permite considerar combinaciones temporales de bienes, en las cuales la producción de frutos y otros productos no madereros puede anteceder al aprovechamiento de la madera. En consecuencia, el diseño silvicultural deberá corresponder al producto prioritario y al horizonte de producción previsto.

Las experiencias documentadas en plantaciones ecuatorianas muestran un comportamiento favorable de la especie durante las fases iniciales de crecimiento. En la información compilada para este capítulo se reportan valores de supervivencia cercanos al 97 %, conjuntamente con incrementos medios anuales aproximados de 20,7 mm en diámetro y 64 cm en altura. Estos antecedentes respaldan el potencial de *J. neotropica* para programas de reforestación productiva en ambientes andinos, aunque la evaluación de su productividad comercial deberá sustentarse en observaciones de mediano y largo plazo. Esta modalidad de establecimiento en bloque puede observarse en plantaciones comerciales de *J. neotropica* localizadas en Natabuela y Pimampiro, provincial de Imbabura (Figura 9.1).

Figura 9.1
Plantaciones de Juglans neotropica con fines comerciales en la provincia de Imbabura, Ecuador

Nota. **(A)** Plantación en bloque en Natabuela, con disposición regular de los árboles orientada al manejo productivo. **(B)** Plantación en ladera en Pimampiro, en una zona de bosque seco tropical, establecida en zanjas perpendiculares a la pendiente para captar la escorrentía superficial, favorecer la infiltración y conservar la humedad del suelo ante la escasez de precipitaciones.

9.1.2. Plantaciones estratégicas para la conservación y el mejoramiento genético

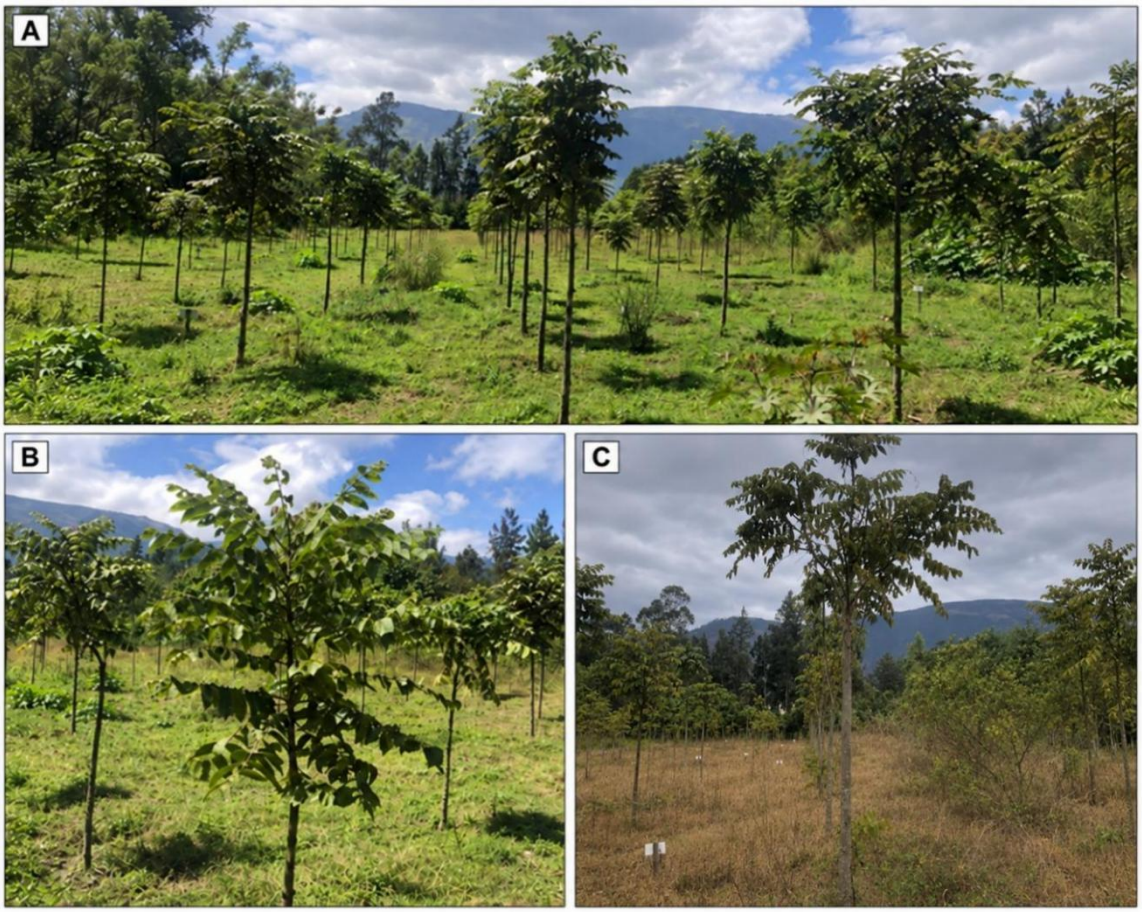
Las plantaciones estratégicas con fines de conservación y mejoramiento genético se diferencian de las plantaciones comerciales convencionales porque su objetivo principal consiste en **representar, evaluar y conservar la variabilidad genética existente entre procedencias, familias o progenies**, generando información que permita seleccionar materiales superiores y, simultáneamente, mantener recursos genéticos de la especie fuera de sus poblaciones naturales.

En Ecuador, este tipo de plantaciones ha adquirido especial importancia durante los últimos años debido al interés por caracterizar la variabilidad genética de *J. neotropica* y establecer bases científicas para su conservación y domesticación. Su desarrollo responde, además, a la necesidad de reducir los riesgos asociados con la fragmentación y disminución de poblaciones naturales, mediante estrategias complementarias de conservación *in situ* y *ex situ* (Ramos-Veintimilla et al., 2024b; Ramos-Veintimilla et al., 2025).

Uno de los principales referentes nacionales corresponde al ensayo de procedencias y progenies establecido en la Granja Experimental Tunshi de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). En este ensayo fueron evaluadas 540 progenies pertenecientes a 45 familias procedentes de Chimborazo, Tungurahua, Bolívar, Pichincha e Imbabura, bajo un diseño de bloques completos al azar, con la finalidad de cuantificar la variación en caracteres de crecimiento, forma y sanidad; la configuración general de esta plantación experimental se presenta en la Figura 9.2.

Figura 9.2

Ensayo de conservación ex situ y mejoramiento genético de Juglans neotropica en el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Imbabura, Ecuador



Nota. **A)** Vista general de la plantación experimental. **B–C)** Individuos que evidencian variación en el crecimiento y la arquitectura del árbol, particularmente en la altura, la conformación del fuste, la ramificación y el desarrollo de la copa. La plantación fue establecida para la conservación de recursos genéticos, la evaluación del crecimiento y la selección de árboles con características fenotípicas sobresalientes.

Los resultados obtenidos en este ensayo evidenciaron una diferenciación genética relativamente baja entre procedencias, mientras que la variación observada entre familias fue considerablemente mayor. Se reportaron valores de heredabilidad individual de 0,09 a 0,18 para diámetro normal y volumen comercial, y una variación genética entre familias comprendida entre 7 y 14 %. La procedencia Tungurahua presentó posiciones destacadas para varias variables de crecimiento, mientras que la selección de los 20 individuos de mejor desempeño permitió estimar una ganancia genética esperada próxima al 18 % en volumen de madera y una reducción aproximada del 10 % en el tiempo requerido para alcanzar el turno de cosecha (Fierro, 2023; Ramos-Veintimilla et al., 2024b).

Evaluaciones posteriores realizadas sobre 439 árboles del norte y centro del Ecuador identificaron diferencias significativas de crecimiento entre progenies y

permitieron discriminar individuos con desempeño superior mediante análisis multivariados. Estos resultados posibilitaron la identificación de genotipos promisorios para programas de mejoramiento y producción futura de semilla mejorada (Ramos-Veintimilla et al., 2025).

Desde el punto de vista silvícola, las plantaciones de procedencias y progenies requieren una configuración experimental que permita separar, en la medida de lo posible, la variación genética de la variación ambiental. Por esta razón, su diseño espacial responde a criterios experimentales y no exclusivamente productivos. La distribución de familias y procedencias debe permitir comparaciones estadísticamente válidas y el seguimiento periódico de variables relacionadas con supervivencia, crecimiento, forma, sanidad y adaptación.

La información obtenida constituye, además, una base para la eventual conformación de huertos semilleros, debido a que permite identificar familias e individuos superiores sin perder de vista la necesidad de conservar una representación adecuada de la diversidad genética de las poblaciones de origen. De esta manera, se articulan dos propósitos complementarios: aumentar progresivamente la ganancia genética y preservar una base genética suficientemente amplia para el futuro manejo de la especie (Ramos-Veintimilla et al., 2024b; Ramos-Veintimilla et al., 2025).

9.1.3. Plantaciones para restauración ecológica

Las plantaciones destinadas a restauración ecológica presentan un objetivo diferente al de las plantaciones comerciales. En ellas, el establecimiento de *J. neotropica* se orienta fundamentalmente a recuperar componentes de la estructura, composición y funcionalidad de ecosistemas degradados y a fortalecer la conectividad entre remanentes de vegetación natural.

En los Andes ecuatorianos, y particularmente en ecosistemas secos interandinos sometidos a procesos de transformación, fragmentación y degradación edáfica, la restauración activa puede complementar los procesos de regeneración natural cuando estos resultan insuficientes. Bajo estas condiciones, el establecimiento de especies arbóreas nativas puede contribuir a reconstruir progresivamente la estructura del ecosistema y a recuperar funciones ecológicas relevantes (Aguirre & Geada-López, 2017; MAE, 2025).

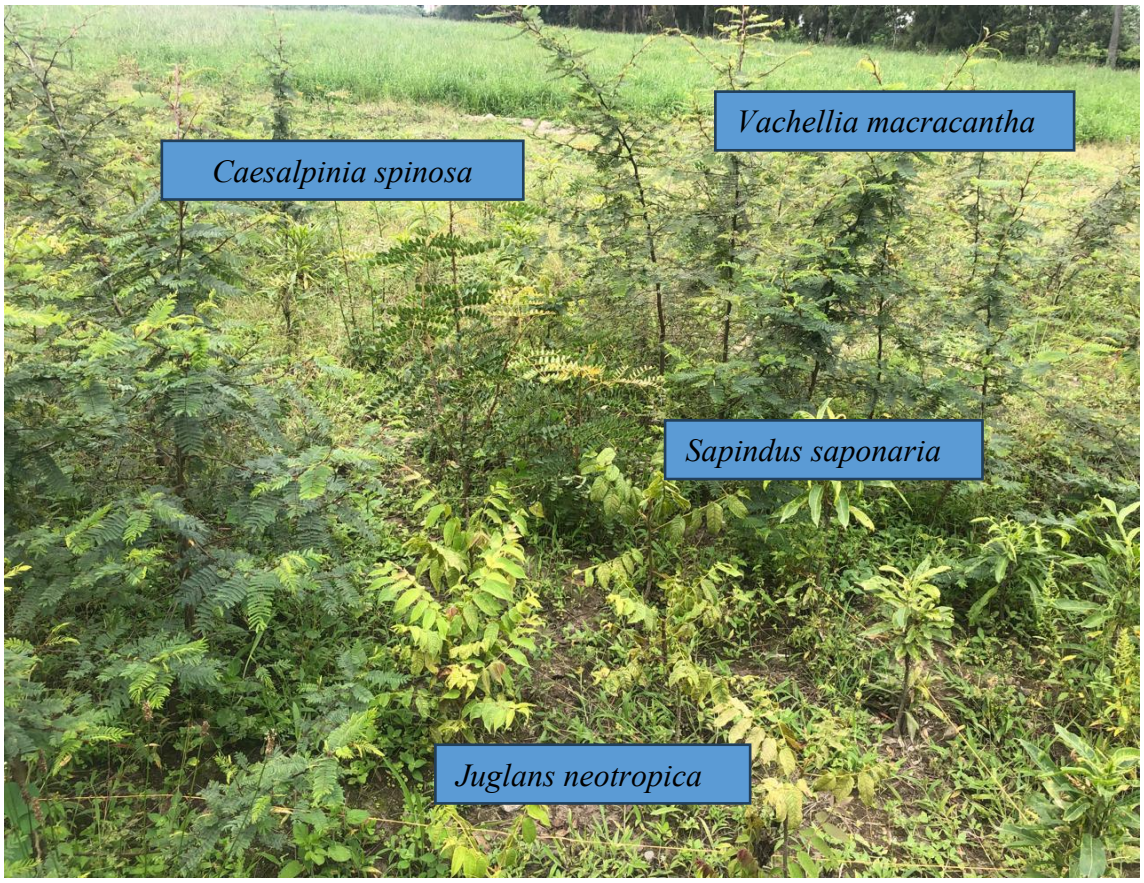
Dentro de estas intervenciones, *J. neotropica* puede incorporarse como componente arbóreo en núcleos de restauración, corredores ecológicos, franjas ribereñas, zonas de amortiguamiento y mosaicos de restauración vinculados con sistemas productivos. La configuración espacial no responde necesariamente a un marco regular de plantación, sino que puede variar de acuerdo con el estado de degradación, la vegetación remanente, el objetivo de conectividad y las características del paisaje.

Una modalidad experimental evaluada en Ecuador corresponde al establecimiento de núcleos densos y multiespecíficos inspirados en el método Miyawaki. Este enfoque se basa en el establecimiento conjunto y a elevada densidad de especies nativas potencialmente compatibles con las condiciones del sitio, buscando acelerar procesos de cobertura y sucesión vegetal (Miyawaki, 2004; Verma & Raghubanshi, 2018).

En el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte se evaluó un núcleo multiespecífico en el que *J. neotropica* fue asociada con *Caesalpinia spinosa*, *Vachellia macracantha* y *Sapindus saponaria*. La experiencia permitió analizar el comportamiento conjunto de las especies bajo un diseño de alta densidad y generó evidencia inicial sobre la factibilidad de incorporar al nogal andino en intervenciones de restauración de ecosistemas secos interandinos (Figura 9.3).

Figura 9.3

Núcleo multiespecífico de restauración ecológica en bosque seco interandino con participación de Juglans neotropica, Caesalpinia spinosa, Vachellia macracantha y Sapindus saponaria, *Imbabura, Ecuador*



Nota. El núcleo corresponde a una intervención experimental de restauración a escala parcelaria basada en un establecimiento denso y multiespecífico. Su articulación con otros núcleos y elementos de conectividad permitiría proyectar la restauración hacia escalas superiores del paisaje.

Los resultados registrados durante los primeros diez meses mostraron diferencias de supervivencia entre condiciones con riego y sin riego, con valores de 69 y 50 %, respectivamente. Debido a que el manejo hídrico corresponde a una técnica de establecimiento y no a la definición de la tipología de plantación, su análisis detallado será retomado posteriormente en la sección correspondiente al manejo hídrico. En esta

sección, dichos resultados únicamente evidencian que el establecimiento mediante núcleos multiespecíficos constituye una alternativa susceptible de evaluación en condiciones de bosque seco interandino.

Desde una perspectiva espacial, los núcleos de restauración pueden concebirse dentro de una organización jerárquica. A escala parcelaria actúan como puntos de establecimiento de vegetación nativa; a una escala intermedia pueden conectarse mediante franjas vegetadas, cercas vivas u otros elementos lineales; y a escala de paisaje pueden articularse con remanentes de vegetación, áreas de conservación y sistemas productivos, contribuyendo progresivamente a incrementar la conectividad ecológica. Esta interpretación se encuentra desarrollada en la propuesta original mediante las escalas micro, meso y macro.

Adicionalmente, en Loja se ha documentado una experiencia de restauración con *J. neotropica* bajo un enfoque asociado al método Miyawaki, en la cual se registró una supervivencia cercana al 88 %, proporcionando evidencia adicional sobre el potencial de la especie para intervenciones de restauración y manejo forestal sostenible (Jiménez & Palacios, 2023).

9.1.4. Plantaciones de enriquecimiento en bosques secundarios

Las plantaciones de enriquecimiento se caracterizan por la introducción deliberada de especies arbóreas dentro de una cobertura forestal existente, generalmente aprovechando claros, fajas o sectores del dosel donde las condiciones de luz permiten el establecimiento y desarrollo de los individuos incorporados. A diferencia de una plantación convencional en terreno abierto, en esta modalidad se mantiene una parte sustancial de la estructura del bosque preexistente y la plantación se integra espacialmente con la vegetación secundaria.

La incorporación de especies nativas de valor ecológico o productivo mediante enriquecimiento puede contribuir a mejorar la composición del bosque, incrementar su complejidad estructural y complementar procesos sucesionales. Estos principios han sido ampliamente considerados en la silvicultura de bosques tropicales y montanos (Lamprecht, 1990; Montagnini & Jordan, 2005).

Una experiencia representativa para *J. neotropica* se encuentra en el sector La Argelia, provincia de Loja, dentro de terrenos pertenecientes a la Universidad Nacional de Loja. La plantación habría sido establecida hace aproximadamente 70 años en un bosque secundario andino ubicado a aproximadamente 2 250 m s. n. m., con temperatura media cercana a 16 °C y precipitación aproximada de 900 mm año^{-1} (Cueva, 2018). Actualmente, esta área cumple principalmente funciones de conservación.

En La Argelia, *J. neotropica* fue incorporada mediante fajas o líneas de plantación y sectores en bloques, adaptados a la topografía, al estado sucesional del bosque y a la disponibilidad de luz. Para este tipo de enriquecimiento se han considerado distancias variables de aproximadamente 3 a 10 m entre árboles y 5 a 10 m entre fajas, configuración

orientada a incorporar los nuevos individuos con una perturbación relativamente limitada de la vegetación existente (Finegan, 1992; Lamprecht, 1990). Esta disposición espacial puede observarse en la plantación de enriquecimiento establecida en La Argelia, provincia de Loja (Figura 9.4).

Esta configuración espacial distingue claramente al enriquecimiento de las plantaciones comerciales en bloque. Mientras estas últimas tienden a utilizar espaciamientos regulares en superficies previamente destinadas al establecimiento forestal, las plantaciones de enriquecimiento deben adaptarse a la estructura, composición, topografía y disponibilidad de luz del bosque receptor. En consecuencia, su distribución suele ser más heterogénea y responde a las oportunidades espaciales existentes dentro del rodal.

Figura 9.4
Plantación de enriquecimiento con Juglans neotropica en bosque secundario andino montano del sector La Argelia, Loja, Ecuador

Nota. Se observa el establecimiento de individuos en fajas dentro de la cobertura forestal existente, conservándose gran parte de la estructura del bosque circundante.

9.1.5. Plantaciones en el arbolado urbano y periurbano

El establecimiento de *J. neotropica* en ambientes urbanos y periurbanos representa una modalidad particular de plantación en la que predominan objetivos ambientales, paisajísticos, culturales y de infraestructura verde. En este contexto, los individuos pueden encontrarse establecidos de forma aislada, en alineaciones, parques, avenidas, parterres, márgenes fluviales, áreas institucionales y predios privados.

La especie forma parte del arbolado de diferentes ciudades interandinas del Ecuador, entre ellas Quito, Cuenca, Ibarra, Loja y Riobamba. En estos ambientes, su presencia se relaciona con la regulación microclimática, almacenamiento de carbono, conservación de biodiversidad urbana, conectividad ecológica y mantenimiento de elementos del paisaje cultural andino.

Los estudios realizados en ciudades ecuatorianas evidencian el interés creciente por valorar la contribución de las especies nativas dentro de la infraestructura verde. En Loja, Merino (2024) analizó más de 5 000 árboles urbanos y documentó la contribución de especies nativas, incluida *J. neotropica*, al área basal, biomasa y almacenamiento de carbono. En Riobamba, Changoluisa (2024) identificó una composición arbórea predominantemente exótica, pero destacó la importancia de incrementar la participación de especies nativas adaptadas a las condiciones de la Sierra central.

En Ibarra, Valverde Armijos et al. (2023) evaluaron específicamente la presencia de *J. neotropica* en la parroquia San Francisco y analizaron su interacción con la infraestructura urbana y la percepción social. Se identificaron conflictos derivados principalmente del establecimiento no planificado próximo a redes eléctricas y elementos viales, al tiempo que se reconoció su elevado valor paisajístico, ambiental y cultural. Una de las configuraciones empleadas corresponde al establecimiento en alineaciones viales, como se observa en la avenida El Retorno de la ciudad de Ibarra (Figura 9.5).

Figura 9.5

Juglans neotropica establecido en alineación vial como componente del arbolado urbano de Ibarra, Imbabura, Ecuador

Nota. Individuos establecidos en el parterre central de la avenida El Retorno. La disposición lineal constituye una de las configuraciones espaciales utilizadas para la incorporación de la especie en la infraestructura verde urbana.

En Cuenca, Minga y Verdugo (2016) documentaron igualmente la presencia de *J. neotropica* en áreas urbanas y periurbanas vinculadas con corredores fluviales, destacando su contribución a la estabilización de suelos, conectividad ecológica y conservación del patrimonio natural urbano. Estos antecedentes evidencian que la incorporación del nogal andino no debe restringirse a parques o avenidas, sino que puede formar parte de redes de infraestructura verde que articulen sectores urbanos, periurbanos y corredores ecológicos.

Sin embargo, las características estructurales de la especie exigen que su utilización en espacios construidos responda a una adecuada planificación. El desarrollo de la copa y del sistema radical puede generar incompatibilidades cuando el espacio disponible resulta insuficiente o cuando los árboles son establecidos próximos a infraestructura vial, edificaciones o redes de servicios. Por esta razón, el diseño de las plantaciones urbanas debe considerar desde el inicio la disponibilidad de espacio aéreo y subterráneo y las dimensiones que alcanzarán los individuos durante su desarrollo (Abad, 2016).

La experiencia colombiana referida por Ramírez (2025) amplía esta perspectiva al señalar el potencial del arbolado urbano para contribuir a la conservación de especies nativas amenazadas y reconocer el valor del nogal en procesos de reforestación y restauración en contextos urbanos.

En conjunto, las experiencias de Ibarra, Loja, Riobamba y Cuenca muestran que *J. neotropica* puede constituir un componente de interés para la infraestructura verde de las ciudades andinas, siempre que su establecimiento responda a criterios de compatibilidad entre el desarrollo biológico del árbol y las características del espacio urbano. Bajo esta perspectiva, su función trasciende el carácter ornamental y se vincula con la conservación de especies nativas, la conectividad ecológica y la provisión de servicios ecosistémicos dentro del paisaje urbano.

9.2. Establecimiento de plantaciones de *J. neotropica*

El establecimiento constituye una fase determinante en el desarrollo de las plantaciones forestales de *J. neotropica*, debido a que durante este período se definen las condiciones iniciales que influirán sobre la supervivencia, el crecimiento y la conformación de los árboles. Independientemente del objetivo de la plantación —productivo, conservación genética, restauración, enriquecimiento o arbolado urbano—, el proceso comprende una secuencia de decisiones relacionadas con la selección del sitio, calidad del material vegetal, preparación del terreno, diseño y trazado, acondicionamiento del micrositio, método de establecimiento y ejecución de la plantación.

La intensidad y características de estas operaciones deben ajustarse a las condiciones ecológicas y topográficas del sitio y a la modalidad de plantación definida previamente. En consecuencia, no existe un procedimiento único aplicable a todos los ambientes en los que se establece *J. neotropica*. La evidencia disponible en Ecuador demuestra, además, que la respuesta inicial de la especie puede variar entre sitios y tratamientos silviculturales, lo que refuerza la necesidad de adecuar las prácticas de establecimiento a las condiciones locales.

9.2.1. Selección del sitio

La selección del sitio constituye la primera decisión técnica para el establecimiento de una plantación de *J. neotropica*. Debe considerarse la correspondencia entre los requerimientos ecológicos de la especie y las condiciones climáticas, edáficas, topográficas e hídricas del área prevista para la plantación. En la literatura utilizada para este capítulo se señalan como favorables los suelos profundos, bien drenados y de textura franca a franco-arenosa, así como condiciones de reacción del suelo ligeramente ácidas a próximas a la neutralidad. Para plantaciones productivas se han señalado, como referencia, ambientes localizados entre aproximadamente 2 000 y 2 800 m s. n. m.; sin embargo, la aptitud definitiva del sitio debe evaluarse considerando conjuntamente los factores ecológicos y el objetivo de establecimiento (Aguirre et al., 2001; FAO, 2014).

La selección del sitio constituye la primera decisión técnica para el establecimiento de una plantación de *J. neotropica*. Debe considerarse la correspondencia entre los requerimientos ecológicos de la especie y las condiciones climáticas, edáficas, topográficas e hídricas del área prevista para la plantación. En la literatura utilizada para este capítulo se señalan como favorables los suelos profundos, bien drenados y de textura franca a franco-arenosa, así como condiciones de reacción del suelo ligeramente ácidas a próximas a la neutralidad, requerimientos biofísicos que han sido convalidados a escala regional para los Andes tropicales (Almeida et al., 2015). Para plantaciones productivas se han señalado, como referencia, ambientes localizados entre aproximadamente 2 000 y 2 800 m s. n. m.; sin embargo, la aptitud definitiva del sitio debe evaluarse considerando conjuntamente los factores ecológicos y el objetivo de establecimiento (Aguirre et al., 2001; FAO, 2014).

La importancia del sitio ha sido evidenciada experimentalmente en el sur del Ecuador. Palacios et al. (2025c) evaluaron el establecimiento de *J. neotropica* en bosque secundario, bosque ribereño y pastizal, observándose diferencias en la respuesta inicial de las plantas. Aunque no se detectaron diferencias significativas generales de crecimiento entre localidades, el diámetro basal alcanzó su mayor valor en pastizal, con 13,2 mm al año, mientras que la mayor altura total fue registrada en bosque secundario, con 54,8 cm al año. El estudio reportó además una supervivencia de hasta 100 % bajo aplicación de urea y una proporción elevada de individuos con tallos rectos durante el primer año.

Resultados complementarios obtenidos en Loja indican que, durante el primer año, las características del sitio pueden ejercer una influencia igual o superior a la fertilización sobre el comportamiento de las plantas. En los ambientes evaluados por Reátegui (2022), el bosque secundario presentó la mayor supervivencia, mientras que el pastizal favoreció los mayores incrementos diamétricos. También fueron observadas diferencias relacionadas con la procedencia genética del material utilizado.

Estos antecedentes muestran que la selección del sitio no debe reducirse a la delimitación física de una superficie disponible. Debe realizarse como una evaluación de aptitud silvicultural en la que sean considerados, al menos, las propiedades del suelo, disponibilidad hídrica, topografía, cobertura vegetal preexistente, exposición y condiciones microclimáticas. En plantaciones urbanas deberán incorporarse además las restricciones derivadas del espacio disponible para el desarrollo aéreo y radical, aspecto particularmente relevante para una especie que puede alcanzar dimensiones considerables.

9.2.2. Selección y calidad del material vegetal

La calidad del material vegetal constituye otro de los factores determinantes durante el establecimiento. En *J. neotropica*, debe considerarse conjuntamente la **calidad genética, morfológica y fisiológica** de las plantas, debido a que estas características condicionan su capacidad de adaptación y respuesta posterior en campo.

La procedencia genética adquiere particular importancia debido a la variabilidad existente entre poblaciones, familias e individuos. Los ensayos realizados en Ecuador han permitido identificar diferencias en crecimiento y sanidad entre materiales genéticos; por ejemplo, en los estudios desarrollados en Tunshi se identificaron familias y procedencias con desempeño superior, lo que proporciona una base para la utilización progresiva de material seleccionado en futuras plantaciones. En consecuencia, siempre que exista disponibilidad, debe priorizarse material proveniente de fuentes identificadas, árboles superiores, rodales semilleros o programas de conservación y mejoramiento genético.

La relevancia de este componente trasciende el crecimiento inicial. La variabilidad heredable puede expresarse en atributos como crecimiento diamétrico y en altura, conformación del fuste, productividad y respuesta frente a factores bióticos y ambientales. Por ello, la utilización de material de origen conocido contribuye a reducir la incertidumbre asociada al establecimiento y permite vincular las plantaciones productivas y de restauración con los programas de conservación genética de la especie.

En el caso de plantas producidas en vivero, la selección debe considerar individuos vigorosos, sanos y con una adecuada relación entre la parte aérea y el sistema radical. Como referencia operativa, pueden emplearse plantas de aproximadamente 30–40 cm de altura, siempre que presenten sistemas radicales bien conformados y ausencia de deformaciones o daños mecánicos. Asimismo, el acondicionamiento o endurecimiento previo mediante cambios progresivos en riego y exposición ambiental favorece la adaptación del material a las condiciones del sitio definitivo (Landis et al., 2010; Thompson, 1985).

Una experiencia desarrollada en el campus Yuyucocha permitió aplicar una selección fenotípica previa al establecimiento. De 700 plantas producidas en vivero, fueron seleccionados 400 individuos de cuatro meses de edad que presentaban características de vigor consideradas favorables para la plantación. El material seleccionado fue posteriormente utilizado para el establecimiento de una plantación experimental en el mismo campus. La secuencia de selección del material vegetal y su posterior establecimiento en campo se presenta en la Figura 9.6.

Figura 9.6

Selección de material vegetal y establecimiento de una plantación experimental de Juglans neotropica en el campus Yuyucocha, Imbabura, Ecuador

Nota. **(A)** Selección fenotípica de plantas producidas en vivero, priorizando individuos vigorosos y con características morfológicas y sanitarias adecuadas. **(B)** Plantación experimental establecida posteriormente con el material vegetal seleccionado.

9.2.3. Preparación del sitio

La preparación del sitio tiene como finalidad generar condiciones favorables para el establecimiento inicial de las plantas, reducir factores limitantes y facilitar las operaciones posteriores de plantación. Su intensidad debe definirse de acuerdo con la cobertura existente, topografía, propiedades físicas del suelo, grado de compactación, riesgo de erosión y objetivo de la plantación.

En terrenos previamente intervenidos, la preparación puede realizarse mediante procedimientos manuales, mecanizados o combinados. Se ha documentado el empleo de herramientas manuales, tracción animal y preparación mecanizada; esta última permite incrementar la remoción inicial del suelo y facilitar las operaciones de establecimiento en sitios donde su utilización resulte técnica y ambientalmente apropiada (Mediavilla, 2023).

La preparación no debe implicar necesariamente una remoción completa de la vegetación o del suelo. En áreas destinadas a restauración, enriquecimiento o terrenos con pendiente, deben priorizarse intervenciones localizadas que reduzcan la perturbación del ecosistema y el riesgo de erosión. Bajo pendientes pronunciadas pueden requerirse

prácticas de conservación de suelos y acondicionamiento del micrositio orientadas a favorecer la infiltración y disminuir el desplazamiento superficial del suelo (Aguirre et al., 2001; FAO, 2014).

Por consiguiente, la preparación del sitio debe concebirse como una intervención diferencial. En plantaciones comerciales establecidas sobre terrenos abiertos puede requerirse una preparación relativamente uniforme; en plantaciones de enriquecimiento, la intervención se concentra en fajas o claros; y en restauración ecológica se priorizan micrositios específicos, conservándose en la medida de lo posible los componentes existentes que contribuyan al funcionamiento del ecosistema.

9.2.4. Diseño, trazado y señalamiento

Una vez definida la modalidad de plantación y preparado el sitio, debe trasladarse al terreno el arreglo espacial establecido durante la fase de planificación. El trazado y señalamiento permiten localizar los puntos de plantación y mantener la distribución prevista de los individuos.

Los espaciamientos dependen del objetivo y fueron desarrollados en la sección 9.1 para cada tipología. Por esta razón, no resulta necesario repetir aquí las distancias recomendadas para plantaciones comerciales, enriquecimiento o restauración. En esta fase, el aspecto fundamental consiste en que el diseño seleccionado sea correctamente materializado sobre el terreno.

El trazado puede responder a arreglos regulares, líneas, fajas, curvas de nivel, bloques experimentales o configuraciones irregulares, dependiendo del tipo de plantación. En terrenos con pendiente, la disposición debe adaptarse a la topografía y privilegiar configuraciones que reduzcan la erosión. En ensayos de procedencias y progenies, por su parte, el señalamiento debe respetar estrictamente el diseño experimental establecido para conservar la identidad de familias, procedencias, bloques y repeticiones.

El campus Yuyucocha proporciona un ejemplo de diseño experimental. En una plantación destinada a investigación se utilizó una separación de 3 m entre hileras y 2,28 m entre plantas, correspondiente a una densidad aproximada de 1 462 plantas ha^{-1}. Estas dimensiones deben interpretarse como parte de un **diseño experimental específico** y no como una recomendación general de espaciamiento para plantaciones comerciales de *J. neotropica*.

Esta aclaración es importante porque evita una contradicción aparente con los espaciamientos productivos de 4 × 4 a 7 × 7 m presentados en 9.1.1. Los primeros corresponden a diseños comerciales según el producto esperado, mientras que el arreglo 3 × 2,28 m respondió a los objetivos particulares del experimento desarrollado en Yuyucocha.

9.2.5. Apertura y acondicionamiento de hoyos

La apertura del hoyo constituye una intervención localizada destinada a proporcionar al sistema radical un volumen inicial de suelo favorable para su

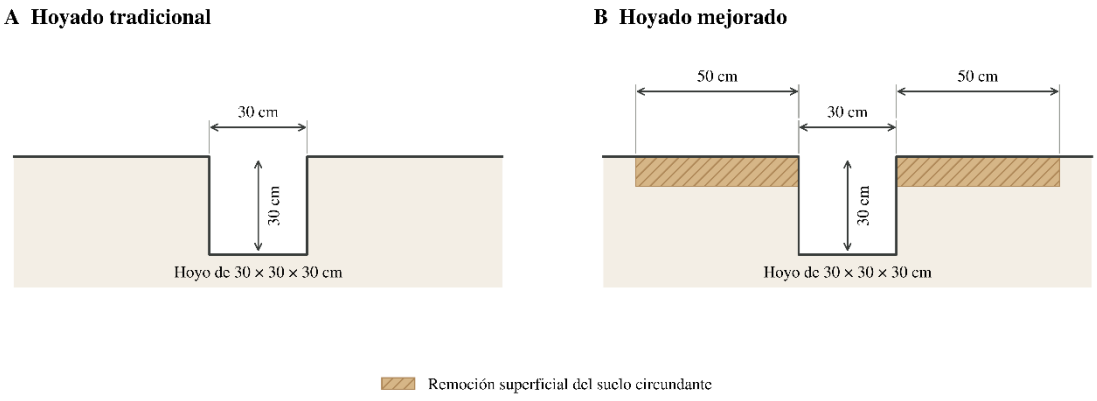
establecimiento. Las dimensiones y características del hoyo deben ajustarse al tamaño del material vegetal, al sistema de producción utilizado en vivero y a las propiedades físicas del suelo.

En la literatura compilada para plantaciones comerciales se han mencionado hoyos de hasta 40 × 40 × 40 cm, acompañados de acondicionamiento del suelo mediante materia orgánica y, cuando se encuentra técnicamente justificado, fuentes de nutrientes. No obstante, estos valores deben interpretarse como referencias técnicas y no como dimensiones universales, dado que el acondicionamiento del micrositio debe responder a las propiedades de cada suelo.

Una evidencia experimental particularmente relevante fue obtenida por Mediavilla (2023) en el campus Yuyucocha. En esta investigación fueron comparados dos tipos de hoyado: un **hoyado tradicional de 30 × 30 × 30 cm** y un **hoyado mejorado**, constituido por el mismo hoyo acompañado de remoción adicional del suelo en un radio aproximado de 50 cm. La configuración de ambos tratamientos se presenta en la Figura 9.7.

Figura 9.7

Tipos de hoyado evaluados para el establecimiento de Juglans neotropica en Yuyucocha, Imbabura, Ecuador



Nota. El hoyado tradicional corresponde a una apertura de 30 × 30 × 30 cm; el hoyado mejorado incorpora adicionalmente la remoción superficial del suelo circundante en un radio aproximado de 50 cm. Adaptado de Mediavilla (2023).

La importancia de este ensayo radica en que el acondicionamiento del micrositio fue evaluado conjuntamente con diferentes modalidades de fertilización en una plantación experimental de 384 plantas y ocho tratamientos. La interacción entre fertilización química y hoyado mejorado produjo mayores incrementos en altura, mientras que la fertilización mixta asociada al hoyado mejorado favoreció el crecimiento en diámetro basal. También fueron registradas diferencias en la condición fitosanitaria de las plantas (Mediavilla, 2023).

Estos resultados indican que la respuesta al hoyado no depende únicamente de las dimensiones de la excavación, sino de la interacción entre las características físicas del micrositio y el manejo nutricional. El análisis específico de la fertilización se desarrolla posteriormente en la sección 9.3, evitando duplicar aquí ese contenido.

9.2.6. Métodos de establecimiento

El establecimiento de *J. neotropica* puede realizarse mediante diferentes tipos de material vegetal. En las experiencias recopiladas para Ecuador se reconocen tres alternativas principales: **siembra directa de semillas, plantación de individuos producidos en vivero y utilización de regeneración natural**.

La elección del método depende de la disponibilidad y calidad del material, objetivo de la intervención, condiciones del sitio, capacidad de mantenimiento y nivel de riesgo aceptable durante las primeras etapas. La plantación con material producido en vivero proporciona mayor control sobre la calidad y distribución de los individuos; la siembra directa reduce algunas operaciones de producción de plantas, pero expone las semillas a mayores factores de pérdida; mientras que la regeneración natural permite *aprovechar individuos ya establecidos y adaptados a las condiciones locales.*

9.2.6.1. Siembra directa

La siembra directa consiste en colocar las semillas de *J. neotropica* directamente en el lugar definitivo de establecimiento, evitando la fase intermedia de producción de plantas en vivero. Se trata de una alternativa técnicamente posible, aunque su utilización ha sido menos frecuente debido a la exposición de las semillas a factores bióticos y abióticos.

Entre los principales riesgos identificados se encuentra la pérdida de semillas por consumo o remoción por fauna, particularmente roedores, así como las variaciones de humedad y temperatura propias del micrositio. Estas limitaciones ayudan a explicar el uso relativamente restringido de la siembra directa frente al establecimiento con material producido en vivero.

Debido al tamaño de las semillas y a los requerimientos germinativos de la especie, este método requiere que exista disponibilidad de humedad durante el período posterior a la siembra y condiciones que reduzcan la pérdida del material. Los aspectos relacionados con calidad, almacenamiento y tratamientos pregerminativos de las semillas corresponden al capítulo específico sobre semillas y propagación, por lo que no deben repetirse en este apartado.

Desde el punto de vista silvicultural, la siembra directa puede considerarse una alternativa para determinados programas de restauración o establecimiento donde exista suficiente disponibilidad de semilla y capacidad de seguimiento; sin embargo, la incertidumbre asociada a germinación, depredación y supervivencia inicial debe ser considerada al planificar su utilización.

9.2.6.2. Plantación con material producido en vivero

La utilización de plantas producidas en vivero constituye el método que permite mayor control sobre las características del material que será trasladado al sitio definitivo. Antes del establecimiento deben seleccionarse individuos vigorosos, sanos, con adecuada conformación del sistema radical y sin daños que puedan comprometer su crecimiento posterior.

La producción previa en vivero permite aplicar criterios de selección morfológica y sanitaria antes de la plantación. Como fue señalado en 9.2.2, en Yuyucocha se seleccionaron 400 plantas de un conjunto inicial de 700 individuos producidos en el mismo campus, priorizándose aquellos que presentaban características fenotípicas favorables.

El material producido en vivero puede establecerse en campo mediante diferentes modalidades, entre ellas plantas con pan de tierra, plantas a raíz desnuda y pseudoestacas. En Ecuador, las experiencias documentadas con *J. neotropica* corresponden principalmente al establecimiento de plantas producidas en recipientes, generalmente fundas o bolsas de vivero, conservando el sustrato alrededor del sistema radical durante el trasplante. Las modalidades a raíz desnuda y mediante pseudoestacas han sido utilizadas de manera exploratoria y a pequeña escala, pero hasta el momento no se dispone de evaluaciones experimentales publicadas que permitan comparar su desempeño.

Como antecedente regional, en Oxapampa, Pasco, Perú, Palomino et al. (1991b) evaluaron el establecimiento de *J. neotropica* utilizando tres tipos de plantones: con pan de tierra, a raíz desnuda y como pseudoestacas. Las mayores supervivencias se obtuvieron con plantas establecidas con pan de tierra (98 %), seguidas por las plantas a raíz desnuda (85 %) y las pseudoestacas (73 %); además, se registraron incrementos medios anuales en altura de hasta 90 cm. Estos resultados muestran que las tres modalidades permitieron el establecimiento de la especie, aunque bajo las condiciones del ensayo el material con pan de tierra presentó la mayor supervivencia.

El acondicionamiento previo del material debe reducir la diferencia entre las condiciones protegidas del vivero y las condiciones del sitio definitivo. El endurecimiento progresivo contribuye a preparar las plantas frente a mayores fluctuaciones de radiación, disponibilidad hídrica, temperatura y viento (Landis et al., 2010; Thompson, 1985).

La plantación con material de vivero resulta particularmente apropiada cuando se requiere conservar la identidad genética de procedencias o familias, establecer diseños espaciales definidos, utilizar material seleccionado o asegurar una densidad inicial determinada. Por estas razones, constituye el método predominante en ensayos genéticos y en numerosas plantaciones productivas y de restauración documentadas para la especie.

9.2.6.3. Uso y manejo de regeneración natural

La regeneración natural constituye una fuente complementaria de material vegetal para el establecimiento y restauración con *J. neotropica*. Su utilización permite aprovechar individuos originados mediante procesos naturales de dispersión,

germinación y establecimiento que ya han superado etapas iniciales de selección ambiental.

En las experiencias documentadas en Imbabura se distinguen, desde una perspectiva operativa, dos grupos de individuos. Las plántulas pequeñas, de **menos de aproximadamente 30 cm**, pueden ser recuperadas para completar su desarrollo bajo condiciones controladas de vivero; mientras que los brinzales de aproximadamente **30 cm a 1,5 m** pueden ser manejados en el sitio donde se originaron o, bajo condiciones apropiadas, utilizados como material para establecimiento en otras áreas.

Los estudios realizados en Natabuela y Bellavista evidencian que la regeneración natural de *J. neotropica* se mantiene activa tanto bajo plantaciones como en sistemas de árboles en linderos, aunque se encuentra condicionada por factores ecológicos y antrópicos (Gonzalon, 2024; Simbaña, 2023).

El establecimiento de individuos juveniles se encuentra particularmente influenciado por las características del microhábitat. Se han señalado como favorables los suelos con adecuada profundidad, drenaje y contenido de materia orgánica, mientras que las diferencias de humedad y temperatura entre plantaciones y sistemas lineales generan condiciones distintas para la germinación y supervivencia inicial (Gonzalon, 2024).

La competencia con gramíneas y otras especies herbáceas constituye uno de los factores que pueden restringir el reclutamiento de las plántulas de *J. neotropica*, al reducir la disponibilidad de luz, agua y nutrientes durante las fases tempranas. La presencia de individuos juveniles registrada en los estudios de Imbabura confirma, no obstante, que existe material susceptible de protección y manejo silvicultural, como se observa en individuos de regeneración natural registrados en Cananvalle, Imbabura (Figura 9.8).

Figura 9.8

Regeneración natural de Juglans neotropica con potencial para manejo silvicultural y establecimiento, Cananvalle, Imbabura, Ecuador

Nota. Se observan individuos juveniles originados mediante regeneración natural que pueden ser conservados *in situ* o considerados, de acuerdo con su tamaño y condición, como material para manejo y establecimiento.

9.2.7. Ejecución de la plantación

La ejecución de la plantación corresponde a la transferencia definitiva del material vegetal al micrositio previamente preparado. Esta operación debe realizarse procurando minimizar alteraciones del sistema radical y mantener una adecuada continuidad entre el sustrato que acompaña a la planta y el suelo circundante.

Cuando se utilizan plantas producidas en recipientes, el envase debe ser retirado procurando conservar la integridad del cepellón y del sistema radical. La planta debe disponerse verticalmente dentro del hoyo, evitando deformaciones de las raíces y manteniendo el cuello radicular próximo al nivel de la superficie del terreno. Posteriormente, el suelo debe incorporarse alrededor del sistema radical y compactarse moderadamente para reducir espacios de aire sin generar condiciones excesivas de compactación.

Durante la plantación, la retirada del recipiente, la colocación de la planta y el cierre del hoyo deben realizarse procurando conservar la integridad del sistema radical y asegurar un contacto adecuado entre el cepellón y el suelo circundante. La poda de raíces solo debe efectuarse cuando existan deformaciones o raíces dañadas que justifiquen su corrección, evitando intervenciones innecesarias que puedan incrementar el estrés del trasplante.

El momento del establecimiento debe corresponder, siempre que sea posible, a un período en el cual exista disponibilidad suficiente de humedad en el suelo. En sitios con marcada estacionalidad de las precipitaciones, el inicio de la época lluviosa proporciona condiciones favorables para reducir el estrés hídrico posterior al trasplante. En ambientes donde la precipitación resulte insuficiente o irregular, el establecimiento deberá vincularse con la disponibilidad de riego suplementario, aspecto que se analiza en la sección 9.3.

Cuando las condiciones del micrositio lo requieran, pueden aplicarse medidas complementarias orientadas a conservar humedad y proteger la planta durante la fase inicial. Sin embargo, estas intervenciones deberán definirse de acuerdo con las condiciones locales y no presentarse como prescripciones universales.

La evidencia obtenida en Ecuador confirma que el desempeño inicial de *J. neotropica* responde a la interacción entre material vegetal, condiciones del sitio y manejo del micrositio. En Yuyucocha, la combinación de hoyado y fertilización produjo respuestas diferenciadas en crecimiento y condición fitosanitaria; mientras que en el sur del país se observaron diferencias asociadas al ambiente de establecimiento. En consecuencia, la plantación debe entenderse como la culminación de un proceso de planificación silvicultural y no como una operación aislada.

Finalizada esta fase, la supervivencia y crecimiento temprano dependen del manejo postestablecimiento, particularmente del control de la vegetación competidora, nutrición y disponibilidad hídrica. Estas prácticas se desarrollan en la sección siguiente.

9.3. Manejo silvicultural durante el establecimiento

Una vez establecida la plantación, la supervivencia y el crecimiento inicial de *J. neotropica* dependen de la capacidad de las plantas para superar las restricciones ambientales y la competencia por recursos durante los primeros años. En esta fase, las prácticas silviculturales se orientan principalmente al control de la vegetación competidora, manejo nutricional y disponibilidad de agua, cuya intensidad debe ajustarse a las condiciones edafoclimáticas, al objetivo de la plantación y al desarrollo alcanzado por los individuos.

La evidencia generada en Ecuador muestra que la respuesta de *J. neotropica* a estas intervenciones no es uniforme. El crecimiento inicial puede estar condicionado simultáneamente por el sitio, las propiedades del suelo, la procedencia del material vegetal, la disponibilidad hídrica y las prácticas de manejo. Por esta razón, las intervenciones posteriores a la plantación deben sustentarse en el seguimiento de la supervivencia, crecimiento y condición sanitaria, evitando la aplicación generalizada de tratamientos cuya efectividad no haya sido demostrada para las condiciones particulares del sitio.

9.3.1. Control de la vegetación competidora

Durante las primeras etapas de establecimiento, la vegetación herbácea puede competir con las plantas de *J. neotropica* por agua, nutrientes y espacio, particularmente en sitios abiertos donde gramíneas y otras especies de rápido crecimiento alcanzan coberturas elevadas. El control de esta vegetación constituye, por tanto, una práctica silvicultural orientada a disminuir la competencia inmediata alrededor de los individuos establecidos.

En las experiencias consideradas para este capítulo, el control se ha realizado principalmente mediante deshierbe manual alrededor de las plantas. La frecuencia debe responder a la velocidad de recuperación de la vegetación, las condiciones climáticas y la disponibilidad hídrica del sitio. Como referencia operativa se ha considerado la realización de uno a dos controles anuales durante los dos primeros años; no obstante, esta frecuencia es orientativa y debe ajustarse a las condiciones específicas de cada plantación.

La intervención debe concentrarse preferentemente en el entorno inmediato de la planta, evitando remover innecesariamente la cobertura del suelo fuera del área donde la competencia resulte significativa. Esta precaución adquiere especial importancia en terrenos con pendiente, proyectos de restauración y plantaciones de enriquecimiento, donde la conservación parcial de la cobertura vegetal contribuye a disminuir procesos erosivos y mantener condiciones microambientales favorables.

La necesidad de controlar la competencia también ha sido observada en la regeneración natural de *J. neotropica*. Los estudios realizados en Imbabura identificaron a las gramíneas y otras especies herbáceas de rápido crecimiento como factores que restringen el establecimiento de individuos juveniles al reducir la disponibilidad de recursos durante las primeras fases de desarrollo. Esta evidencia respalda la importancia de un manejo selectivo de la vegetación competidora durante el establecimiento de plantaciones.

9.3.2. Uso de herbicidas

El control químico de la vegetación competidora requiere especial precaución en plantaciones de *J. neotropica*, debido a que la evidencia disponible no demuestra necesariamente una respuesta favorable de la especie frente a esta práctica.

González & Ordoñez (2009), en un estudio desarrollado en la Estación Científica San Francisco, provincia de Zamora Chinchipe, evaluaron ocho especies forestales

plantadas bajo diferentes estados sucesionales. En el caso de *J. neotropica*, la aplicación de glifosato no produjo una respuesta favorable durante el establecimiento.

Los individuos sometidos al manejo químico presentaron mayores porcentajes de mortalidad que aquellos establecidos en parcelas sin este tratamiento; asimismo, las plantas en unidades sin aplicación de herbicida registraron mejores respuestas en altura y diámetro basal.

Estos resultados indican que el uso de herbicidas no debe considerarse una práctica rutinaria para el establecimiento de *J. neotropica*. Cuando sea necesario reducir la competencia, debe priorizarse el control localizado y selectivo, particularmente durante las primeras etapas, evitando intervenciones químicas generalizadas que puedan afectar directamente a las plantas o modificar desfavorablemente las condiciones del micrositio.

De esta manera, el control de la vegetación competidora debe entenderse como una práctica de **manejo selectivo**, y no como la eliminación completa de la cobertura acompañante.

9.3.3. Manejo nutricional y fertilización

El manejo nutricional constituye una de las prácticas silviculturales más relevantes durante el establecimiento inicial de *J. neotropica*, particularmente en sitios donde las características edáficas limitan la disponibilidad de nutrientes esenciales. La fertilización puede favorecer el crecimiento y vigor de las plantas; sin embargo, su efectividad depende de la interacción entre las propiedades del suelo, el tipo y dosis de fertilizante, las condiciones climáticas, la procedencia del material vegetal y otras prácticas de establecimiento, como el acondicionamiento del micrositio.

En consecuencia, la fertilización no debe aplicarse como una prescripción uniforme. Su planificación debe sustentarse, preferentemente, en análisis de suelo y, cuando sea posible, complementarse con evaluaciones del estado nutricional de las plantas. Este criterio adquiere especial importancia en *J. neotropica*, debido a que los estudios realizados en Ecuador muestran respuestas diferentes entre sitios y tratamientos, lo que evidencia que la disponibilidad de nutrientes constituye solo uno de los componentes que regulan el establecimiento de la especie.

En las experiencias documentadas se han utilizado fertilizantes inorgánicos, enmiendas orgánicas y combinaciones de ambos. Asimismo, se han evaluado diferentes formas de aplicación, tanto durante el establecimiento como una vez implantada la plantación. La aplicación localizada permite concentrar los nutrientes en el entorno próximo al sistema radical, mientras que en plantas ya establecidas puede efectuarse una distribución alrededor del individuo, procurando evitar el contacto directo de concentraciones elevadas de fertilizante con las raíces. Estas modalidades se ilustran en la Figura 9.9.

Figura 9.9

Modalidades de aplicación de fertilizantes durante el establecimiento de Juglans neotropica en Yuyucocha, Imbabura, Ecuador

Nota. Aplicación localizada durante el establecimiento (izquierda) y fertilización en corona alrededor de una planta establecida (derecha). En ambos casos debe evitarse el contacto directo de concentraciones elevadas de fertilizante con el sistema radical.

La evidencia nacional indica que la respuesta de *J. neotropica* a la fertilización puede expresarse tanto en variables estructurales —altura, diámetro basal, área basal y desarrollo de copa— como en variables fisiológicas, aunque no siempre se observan respuestas significativas en todos los sitios o durante períodos cortos de evaluación. Asimismo, el efecto nutricional puede verse condicionado por factores bióticos, disponibilidad hídrica y características particulares del suelo, por lo que las dosis evaluadas experimentalmente deben interpretarse en el contexto específico de cada sitio y no extrapolarse directamente como recomendaciones generales.

9.3.3.1. Evidencia experimental sobre fertilización en plantaciones de J. neotropica en Ecuador

Las investigaciones desarrolladas en distintas regiones del Ecuador constituyen una base experimental relevante para comprender la respuesta inicial de *J. neotropica* al manejo nutricional. Los estudios disponibles abarcan condiciones ambientales contrastantes en Imbabura, Loja, Santo Domingo de los Tsáchilas y Chimborazo, lo que permite analizar la fertilización en relación con el sitio, el acondicionamiento del suelo, la procedencia del material vegetal y las condiciones climáticas.

En el norte del país, Mediavilla (2023) evaluó en el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte la interacción entre fertilización química, orgánica y combinada y dos modalidades de hoyado. La fertilización química asociada con el hoyado mejorado produjo los mayores incrementos en altura, diámetro basal y diámetro de copa, mientras que la combinación de fertilización química y orgánica favoreció otras variables de desarrollo. La supervivencia alcanzó 99,4 % durante el período evaluado.

Los resultados obtenidos en Yuyucocha muestran que la respuesta a la fertilización no depende exclusivamente del aporte de nutrientes, sino también de las condiciones físicas del micrositio. La interacción entre hoyado y fertilización evidenció que el acondicionamiento del suelo puede modificar la expresión del crecimiento inicial de las plantas, lo que refuerza la necesidad de analizar conjuntamente los componentes físicos y nutricionales del establecimiento.

En el sur del Ecuador, Reátegui (2022) evaluó la respuesta inicial de *J. neotropica* en la Hacienda La Florencia, provincia de Loja, bajo tres ambientes de establecimiento: pastizal, bosque secundario y bosque ribereño. Durante el primer año, el efecto del sitio resultó más evidente que el de la fertilización. El bosque secundario presentó la mayor supervivencia, mientras que el pastizal produjo mayores incrementos diamétricos; adicionalmente, la procedencia El Tundo mostró un mejor comportamiento que La Victoria.

Esta experiencia evidencia que la fertilización no compensa necesariamente condiciones ambientales restrictivas y que la respuesta silvicultural puede estar fuertemente condicionada por la interacción entre sitio y procedencia genética. Por tanto, el manejo nutricional debe ser entendido como parte de un sistema de establecimiento y no como un factor aislado.

Una evidencia particularmente relevante se obtuvo en el Campus Experimental La Favorita de la Universidad Técnica del Norte, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. Ibarra Becerra & Yajamin Suquillo (2026) evaluaron diferentes dosis de fosfato diamónico 18-46-0 en una plantación de *J. neotropica* establecida entre aproximadamente 1 600 y 1 700 m s. n. m. Este ensayo amplía la evidencia experimental de la especie hacia condiciones tropicales húmedas y a menor altitud que la mayoría de los estudios desarrollados en los valles interandinos. El sitio presenta suelos de origen volcánico, ligeramente ácidos y con baja disponibilidad de fósforo, condición que justificó la evaluación de fertilización fosfatada.

Las dosis evaluadas fueron 0, 50, 100 y 150 g por planta de fertilizante 18-46-0, establecidas a partir de un diagnóstico nutricional previo del suelo. Después de diez meses de evaluación, la dosis de 150 g por planta presentó la respuesta más favorable, con valores finales de 63,23 cm de altura y 1,98 cm² de área basal, significativamente superiores al tratamiento testigo.

La supervivencia general de la plantación de La Favorita alcanzó 75 %, mientras que el tratamiento de 150 g registró 78,7 %. El estado fitosanitario no mostró diferencias significativas entre tratamientos. El estudio registró incidencia de Gretchena garai; por tanto, su presencia se presenta aquí como un factor fitosanitario observado en el sitio, sin atribuir causalmente su incidencia a las condiciones de elevada humedad y precipitación.

Este resultado es especialmente importante desde el punto de vista silvicultural, porque demuestra que la corrección de una limitación nutricional específica puede favorecer el crecimiento inicial de *J. neotropica*, pero no necesariamente reducir los efectos de factores bióticos o ambientales que actúan simultáneamente sobre la plantación.

En la región central del país, la Estación Experimental Tunshi de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ha concentrado varios estudios sobre manejo nutricional de la especie. Rosero (2011) evaluó dosis de fertilizante 10-30-10 de 100, 200 y 250 g por planta combinadas con humus. Las dosis mayores incrementaron significativamente la altura, diámetro y vigor; sin embargo, el análisis económico identificó la dosis intermedia de 200 g por planta como la alternativa más eficiente en relación con el crecimiento obtenido y el costo del tratamiento.

Posteriormente, Ávila (2024) evaluó catorce tratamientos de fertilización NPK en el mismo sitio e incorporó variables fisiológicas, entre ellas contenido de clorofila y nutrientes foliares. Durante el período de evaluación no se detectaron diferencias significativas de crecimiento entre tratamientos; sin embargo, el nitrógeno mostró efectos positivos sobre variables asociadas con la fisiología fotosintética, mientras que las dosis elevadas de fósforo incrementaron los costos sin producir beneficios equivalentes durante el período analizado.

La evidencia experimental acumulada permite reconocer un patrón común: la respuesta de *J. neotropica* a la fertilización es **dependiente del sitio y de la interacción con otros factores silviculturales**. En Yuyucocha, la respuesta se vio favorecida por la combinación entre fertilización y acondicionamiento del micrositio; en La Florencia, las características del ambiente y la procedencia ejercieron una influencia importante; en La Favorita, la fertilización fosfatada produjo una respuesta positiva en un suelo con baja disponibilidad de fósforo, aunque el comportamiento de la plantación estuvo condicionado por factores fitosanitarios; y en Tunshi, las respuestas variaron según dosis, período de evaluación y variable considerada.

En conjunto, estos resultados muestran que no existe una dosis universal de fertilización para *J. neotropica*. Las prescripciones nutricionales deben definirse a partir de las características edáficas del sitio, el estado nutricional de la plantación y los objetivos de manejo. Asimismo, la eficiencia de la fertilización debe evaluarse conjuntamente con la disponibilidad hídrica, el acondicionamiento del suelo, la procedencia genética y la condición fitosanitaria de los individuos. Los resultados obtenidos hasta el momento corresponden principalmente a las fases iniciales de establecimiento; por tanto, se requieren evaluaciones de mayor duración para determinar si las respuestas tempranas se mantienen en el crecimiento diamétrico, conformación del fuste y productividad de las plantaciones a mediano y largo plazo.

9.3.3.2. Fertilización orgánica e inorgánica: respuestas complementarias

La comparación entre fertilización orgánica e inorgánica permite diferenciar respuestas relacionadas con el crecimiento estructural y el estado fisiológico de las plantas. En San Roque, provincia de Imbabura, Morales (2026) evaluó ambos tipos de fertilización durante el crecimiento inicial de *J. neotropica*.

Los tratamientos inorgánicos con NPK 10-30-10, particularmente la dosis de 400 g por planta evaluada en ese estudio, produjeron mayores valores de altura, diámetro basal y diámetro de copa. Por su parte, la fertilización orgánica mediante humus de lombriz mostró una respuesta significativa en variables fisiológicas, especialmente en la concentración de pigmentos clorofílicos.

Estas respuestas sugieren funciones diferenciadas y potencialmente complementarias. Mientras que los fertilizantes inorgánicos pueden producir respuestas relativamente rápidas en variables de crecimiento cuando existen limitaciones nutricionales específicas, los materiales orgánicos pueden contribuir al estado nutricional y fisiológico de las plantas y, adicionalmente, modificar progresivamente algunas propiedades del suelo.

Sin embargo, las dosis evaluadas en experimentos particulares no deben extrapolarse directamente como recomendaciones generales. El manejo nutricional de *J. neotropica* debe ajustarse a las características del suelo, edad de la plantación, condiciones climáticas y resultados del seguimiento del crecimiento. La evidencia disponible permite sustentar la importancia de la fertilización durante el establecimiento, pero todavía requiere evaluaciones de mayor duración para determinar sus efectos sobre productividad forestal de mediano y largo plazo.

9.3.4. Manejo hídrico y riego suplementario

La disponibilidad de agua constituye uno de los factores ambientales más importantes durante el establecimiento de *J. neotropica*, particularmente durante los primeros períodos secos posteriores a la plantación. Aunque el establecimiento al inicio de la época lluviosa permite aprovechar la humedad natural del suelo, las variaciones estacionales de precipitación pueden generar períodos de déficit hídrico que comprometan el crecimiento o la supervivencia.

La información experimental sobre requerimientos hídricos específicos de *J. neotropica* en Ecuador todavía es limitada. No obstante, el estudio realizado por Varela (2023) en el campus Yuyucocha proporciona una primera aproximación cuantitativa al comportamiento del balance hídrico durante el establecimiento de una plantación.

9.3.4.1. Balance hídrico durante el establecimiento: estudio de caso en Yuyucocha

El estudio fue desarrollado en el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, a 2 243 m s. n. m., con el propósito de evaluar el balance hídrico superficial durante el primer año de establecimiento de *J. neotropica*. Se utilizaron seis parcelas que comprendieron una superficie total de 2 592 m² y 384 plantas, establecidas sobre Inceptisoles de textura franco-arenosa, bajo condiciones climáticas caracterizadas en el estudio por una temperatura media de 18,4 °C y precipitación anual de 589 mm.

Para la determinación del balance hídrico fueron evaluadas la precipitación, infiltración, almacenamiento de agua en el suelo y evapotranspiración real y potencial, mediante la aplicación del modelo de Thornthwaite-Mather y análisis de regresión múltiple.

Los resultados mostraron una marcada dependencia del balance hídrico respecto de la precipitación. En septiembre se registró una precipitación de 184 mm y un exceso hídrico de 73,3 mm, mientras que en junio la precipitación descendió a 32 mm y la infiltración a 2 mm. La mayor evapotranspiración se registró en febrero, con 92,7 mm, y el mayor déficit hídrico en enero, con 29,6 mm. Asimismo, se encontró una relación significativa entre precipitación e infiltración, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,82$.

El balance obtenido indicó que, aunque la precipitación constituye la principal entrada de agua al sistema, la capacidad de almacenamiento del suelo puede resultar insuficiente durante determinados meses secos. En consecuencia, Varela (2023) señaló la necesidad de considerar **riego suplementario durante los períodos de déficit**, particularmente durante la fase inicial del establecimiento.

Esta evidencia resulta especialmente relevante para plantaciones establecidas en ambientes secos interandinos o en sitios donde la distribución anual de las precipitaciones presenta períodos de déficit. Sin embargo, los resultados corresponden a un sitio, tipo de suelo y período de evaluación determinados; por tanto, no permiten todavía establecer un requerimiento hídrico universal para *J. neotropica*. La programación del riego debe sustentarse en las condiciones climáticas locales, capacidad de almacenamiento del suelo, desarrollo de las plantas y seguimiento de la humedad disponible.

Con ello, el manejo hídrico se incorpora como una práctica adaptativa y no como una prescripción fija. Durante los primeros años, el objetivo principal consiste en evitar déficits prolongados capaces de comprometer el establecimiento, sin generar condiciones de saturación que puedan afectar la aireación del sistema radical.

9.4. Regeneración natural y manejo silvicultural de *J. neotropica*

La regeneración natural constituye un proceso fundamental para la permanencia de las poblaciones de *J. neotropica* y para la sostenibilidad de los sistemas forestales y agroforestales donde la especie se encuentra presente. A diferencia del establecimiento mediante plantas producidas en vivero o siembra directa, este proceso depende de la producción y dispersión de semillas, disponibilidad de micrositios favorables, germinación, establecimiento de plántulas y supervivencia de los individuos juveniles hasta su incorporación progresiva a estratos superiores.

Desde una perspectiva silvicultural, la presencia de regeneración natural representa una oportunidad para complementar las plantaciones y favorecer procesos de restauración y conservación. Sin embargo, su existencia no garantiza por sí sola el reemplazo de los árboles adultos. Para que la regeneración contribuya efectivamente a la permanencia de la población debe producirse un reclutamiento suficiente y mantenerse la continuidad entre plántulas, brinzales, individuos juveniles y árboles reproductivos.

En la provincia de Imbabura, los estudios desarrollados en agroecosistemas de Natabuela, caracterizado por una plantación de *J. neotropica*, y Bellavista, donde la especie se encuentra principalmente en árboles de lindero, evidencian procesos activos de regeneración natural bajo configuraciones espaciales contrastantes. Estos estudios muestran, al mismo tiempo, que el establecimiento y permanencia de los individuos

juveniles están condicionados por factores edáficos, microclimáticos, bióticos y antrópicos (Gonzalon, 2024; Simbaña, 2023).

9.4.1. Dinámica y condiciones para la regeneración natural

La regeneración de *J. neotropica* comienza con la disponibilidad de semillas viables y su llegada a micrositios que permitan la germinación y posterior establecimiento. En este proceso intervienen características del suelo, disponibilidad de humedad, temperatura, cobertura vegetal y relaciones con otros componentes bióticos del ecosistema.

Los estudios realizados en Imbabura señalan que la regeneración ocurre preferentemente en suelos profundos, bien drenados y con presencia de materia orgánica. En plantaciones, una mayor homogeneidad de las condiciones microambientales puede favorecer la conservación de humedad, mientras que en sistemas lineales o árboles de lindero los individuos juveniles están sometidos a una mayor heterogeneidad espacial de humedad y temperatura (Gonzalon, 2024).

Estas diferencias son relevantes porque la regeneración natural no responde únicamente a las características generales del sitio, sino a condiciones que operan a escala de micrositio. La distribución de la hojarasca, cobertura herbácea, exposición a la radiación, proximidad a árboles adultos y disponibilidad temporal de humedad pueden generar oportunidades diferentes para la germinación y supervivencia inicial.

Estudios complementarios han señalado que *J. neotropica* puede presentar patrones de distribución agregada, con individuos concentrados en determinados sectores y asociados espacialmente con árboles de la misma especie (Vaca & Palacios, 2023). Este patrón puede relacionarse con la dispersión relativamente localizada de las semillas, la proximidad de árboles reproductivos, la afinidad por determinados micrositios y la historia de uso del suelo.

Desde el punto de vista silvicultural, esta distribución implica que la evaluación de la regeneración no debe limitarse al número total de individuos presentes. Resulta necesario considerar también su distribución espacial, estado de desarrollo y capacidad de progresar hacia categorías estructurales superiores.

9.4.2. Estructura de la regeneración y flora asociada

La regeneración natural se desarrolla dentro de comunidades vegetales cuya composición puede modificar las condiciones de establecimiento de *J. neotropica*. Los inventarios realizados en Natabuela y Bellavista mostraron diferencias importantes en la flora acompañante entre una plantación y un sistema de árboles en linderos.

En Natabuela se registraron **665 individuos de flora acompañante**, con predominio de las familias Cyperaceae, Poaceae, Fabaceae y Juglandaceae, mientras que en Bellavista fueron contabilizados **251 individuos**, con mayor representación de Casuarinaceae, Rutaceae, Malvaceae y Juglandaceae (Simbaña, 2023). Estas diferencias reflejan la influencia de la estructura del sistema, las prácticas de manejo y el grado de intervención sobre la composición de la vegetación asociada.

La presencia de Poaceae y Cyperaceae adquiere particular importancia durante las primeras fases de regeneración debido a la competencia que puede producirse por agua, nutrientes y espacio. Esta relación ayuda a explicar por qué la presencia de semillas o incluso de plántulas recién germinadas no necesariamente conduce al reclutamiento exitoso de individuos juveniles.

La estructura poblacional constituye otro indicador relevante. Una población capaz de mantenerse a largo plazo requiere no solo regeneración reciente, sino también individuos distribuidos entre diferentes categorías de tamaño. La información disponible muestra predominancia de individuos jóvenes y una representación comparativamente menor en clases diamétricas superiores, situación que puede comprometer progresivamente la disponibilidad de árboles adultos si las cohortes juveniles no logran avanzar estructuralmente.

Por tanto, el diagnóstico de la regeneración debe considerar conjuntamente **abundancia, estructura y reclutamiento**. Una elevada cantidad de plántulas en un momento determinado no necesariamente representa regeneración exitosa si posteriormente ocurre una elevada mortalidad o los individuos permanecen restringidos a las categorías iniciales.

9.4.3. Interacciones con la fauna

La fauna participa en diferentes etapas del ciclo de regeneración de *J. neotropica*. Las relaciones pueden ser favorables, cuando contribuyen a procesos ecológicos como dispersión o polinización, o desfavorables cuando implican consumo de semillas, herbivoría o daños producidos por insectos.

En los estudios realizados en Imbabura se registraron diferencias importantes en la abundancia de fauna asociada entre los dos sistemas evaluados. En Bellavista fueron contabilizados **675 insectos y 158 aves**, mientras que en Natabuela se registraron **147 insectos y 109 aves** (Gonzalon, 2024).

Estas diferencias sugieren que la configuración del sistema y su contexto paisajístico pueden influir sobre las comunidades faunísticas asociadas. Sin embargo, la abundancia de organismos no debe interpretarse automáticamente como un efecto positivo sobre la regeneración, debido a que los distintos grupos pueden desempeñar funciones ecológicas contrastantes.

En consecuencia, la fauna debe considerarse como un componente funcional del proceso de regeneración y no únicamente como biodiversidad asociada. La conservación de interacciones favorables y la identificación de organismos que ocasionan daños forman parte de una aproximación integral al manejo de la especie.

9.4.4. Factores limitantes de la regeneración

La regeneración natural de *J. neotropica* se encuentra condicionada por múltiples factores que actúan en diferentes etapas del proceso, desde la disponibilidad y germinación de semillas hasta la supervivencia y crecimiento de los individuos juveniles. Los estudios realizados en Imbabura identificaron limitaciones relacionadas con la

competencia vegetal, condiciones microambientales, factores bióticos y presión antrópica (Gonzalon, 2024; Simbaña, 2023).

Entre estas limitaciones, la competencia ejercida por gramíneas y otras especies herbáceas puede restringir la disponibilidad de agua, nutrientes y espacio durante las fases iniciales. Este efecto adquiere mayor importancia durante períodos de menor disponibilidad hídrica, cuando la competencia por agua puede comprometer la supervivencia de las plántulas.

La disponibilidad de humedad constituye igualmente un factor crítico. Las variaciones microclimáticas entre plantaciones, linderos y otros sistemas de uso del suelo generan condiciones diferentes para la germinación y establecimiento, por lo que la presencia de árboles semilleros no garantiza necesariamente la formación de una nueva cohorte.

También deben considerarse los daños ocasionados por plagas y enfermedades y las alteraciones derivadas del uso del suelo. La tala selectiva, degradación del hábitat y eliminación de árboles reproductivos pueden reducir simultáneamente la disponibilidad de semilla y la existencia de micrositios adecuados, comprometiendo la continuidad de la regeneración.

Los efectos alelopáticos atribuidos a compuestos del género *Juglans*, entre ellos la juglona, constituyen un mecanismo potencialmente relevante para las interacciones con la vegetación acompañante. Sin embargo, los inventarios realizados en Natabuela y Bellavista no evaluaron experimentalmente la alelopatía; por tanto, las diferencias observadas en la composición florística no pueden atribuirse causalmente a la juglona. Su posible influencia bajo las condiciones locales requiere evaluación experimental específica.

9.4.5. Implicaciones para el manejo y la regeneración asistida

La evidencia disponible muestra que *J. neotropica* conserva capacidad de regeneración natural en paisajes intervenidos de Imbabura, tanto en plantaciones como en sistemas lineales. Sin embargo, la presencia de plántulas y brinzales debe diferenciarse de un proceso de regeneración plenamente exitoso, debido a que la sostenibilidad poblacional depende de que una proporción suficiente de estos individuos sobreviva, crezca y se incorpore progresivamente a categorías juveniles y adultas.

Desde una perspectiva silvicultural, la regeneración asistida puede orientarse a **favorecer procesos naturales ya existentes**, en lugar de sustituirlos mediante plantación. Las intervenciones pueden incluir la identificación y protección de árboles reproductivos, la conservación de plántulas y brinzales establecidos, el control selectivo de la vegetación competidora alrededor de los individuos juveniles y la protección de micrositios favorables. Estas prácticas adquieren particular importancia cuando existe regeneración, pero determinados factores ambientales o antrópicos limitan el reclutamiento y la transición de los individuos hacia categorías de mayor tamaño.

Cuando la regeneración presenta una distribución agregada, el manejo puede concentrarse en los sectores donde ya existe reclutamiento, reduciendo la intensidad de

las intervenciones. En cambio, en áreas donde existen árboles reproductivos pero la regeneración es escasa o inexistente, resulta necesario identificar previamente cuál etapa del proceso constituye la principal limitación: disponibilidad de semillas, germinación, establecimiento o supervivencia de los individuos juveniles.

En la plantación de *J. neotropica* de Natabuela, Imbabura, sitio donde también se desarrollaron los estudios de Gonzalon (2024) y Simbaña (2023), las observaciones de campo realizadas durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) permitieron documentar una práctica local particular asociada con el manejo de la regeneración natural. Durante el período de caída de los frutos maduros, el propietario permite el ingreso de gallinas (*Gallus gallus domesticus*) a la plantación. Las aves consumen las larvas y parte del material orgánico asociado al mesocarpio en proceso de descomposición, contribuyendo simultáneamente a la remoción de esta cubierta y dejando las nueces parcial o completamente libres del mesocarpio. Posteriormente, se ha observado la germinación natural de algunas de estas semillas y el establecimiento de plántulas dentro de la plantación (Programa de Investigación *Juglans*, 2021–2026).

Esta práctica corresponde a una **observación de campo de manejo local y no a un tratamiento experimentalmente evaluado**; por tanto, la información disponible no permite atribuir a la intervención de las aves un efecto causal sobre la germinación. No obstante, la observación plantea una hipótesis de interés silvicultural acerca de la posible relación entre la remoción del mesocarpio mediante fauna doméstica y las condiciones posteriores para la germinación y establecimiento natural de *J. neotropica*. Su evaluación experimental permitiría determinar posibles efectos sobre la sanidad de las semillas, el proceso de descomposición del fruto, el porcentaje y velocidad de germinación y la supervivencia inicial de las plántulas.

La regeneración asistida adquiere especial relevancia en plantaciones destinadas a restauración, enriquecimiento de bosques secundarios y sistemas agroforestales, donde los individuos establecidos naturalmente pueden complementar la densidad inicial y contribuir progresivamente a incrementar la heterogeneidad estructural del sistema. El manejo debe priorizar la conservación *in situ* de estos individuos cuando las condiciones sean favorables; la recuperación y traslado de plántulas o brinzales, descritos previamente en la sección 9.2.6.3, constituyen alternativas cuando exista una finalidad específica de establecimiento.

En conjunto, los estudios de Simbaña (2023) y Gonzalon (2024), complementados por las observaciones de campo del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), evidencian que la regeneración natural de *J. neotropica* constituye un proceso activo, pero condicionado por la interacción entre las características del micrositio, la vegetación acompañante, la fauna, la disponibilidad de humedad y las prácticas de manejo. Desde esta perspectiva, el manejo silvicultural no debe orientarse únicamente a incrementar el número inicial de plántulas, sino principalmente a **favorecer su supervivencia, reclutamiento y transición hacia categorías estructurales superiores**, contribuyendo así a la continuidad generacional de la especie.

9.5. *J. neotropica* en los instrumentos de política forestal y restauración del Ecuador

El establecimiento, manejo y conservación de *J. neotropica* no dependen únicamente del conocimiento silvicultural disponible sobre la especie, sino también de su articulación con los instrumentos de política pública que orientan la gestión forestal, la restauración ecológica y el manejo de los recursos genéticos forestales en Ecuador. Estos instrumentos operan en diferentes escalas territoriales y temporales y establecen lineamientos relacionados con la selección de especies, procedencia del material reproductivo, establecimiento de plantaciones, regeneración natural asistida, restauración de ecosistemas y paisajes, sistemas agroforestales y conservación de la diversidad genética.

En este contexto, cuatro instrumentos presentan particular relación con la silvicultura de *J. neotropica*: la Norma de Semillas Forestales, que establece criterios para la producción y utilización de material reproductivo de procedencia y calidad conocida; el Plan de Forestación y Reforestación de la Provincia de Imbabura, que reconoce expresamente al nogal entre las especies consideradas para diferentes intervenciones forestales; el Plan Nacional de Restauración Ecológica con Enfoque de Paisaje 2025–2035 (PNREP), que establece el marco nacional para la restauración; y la Estrategia Forestal Sostenible del Ecuador 2026–2050 (EFSE), que proporciona una orientación de largo plazo para la gestión sostenible del patrimonio forestal. Analizados conjuntamente, estos instrumentos permiten relacionar la evidencia científica y silvicultural presentada en este capítulo con las actuales prioridades de política forestal y restauración del país.

9.5.1. Plan de Forestación y Reforestación de la Provincia de Imbabura

El Plan de Forestación y Reforestación de la Provincia de Imbabura (PFRPI) fue formulado como un instrumento de gestión y planificación orientado al desarrollo sustentable del sector forestal provincial, articulando la conservación de ecosistemas estratégicos con la provisión de bienes y servicios ambientales. Su formulación responde, además, a las competencias concurrentes asignadas a los Gobiernos Autónomos Descentralizados provinciales para desarrollar actividades de forestación y reforestación con fines productivos, de protección y conservación.

El Plan adopta una perspectiva territorial amplia al identificar áreas potenciales para producción forestal, conservación y protección, restauración, recuperación y agroforestería. Entre las modalidades consideradas se encuentran la restauración forestal, regeneración natural asistida, enriquecimiento con especies nativas, sistemas agroforestales y silvopastoriles, árboles en linderos y cercas vivas.

Para *J. neotropica*, este instrumento tiene particular importancia porque **incluye explícitamente al nogal entre las especies forestales consideradas para la provincia**. La especie aparece dentro del conjunto de especies con potencial para reforestación, con un rango altitudinal señalado de 1 000 a 3 000 m s. n. m., temperaturas de 11,8 a 18,8 °C y precipitaciones de 600 a 2 500 mm. Asimismo, es considerada entre las especies propuestas para diferentes objetivos y sistemas de intervención en ambientes de bosque seco, evidenciando su potencial para distintas modalidades de establecimiento.

Esta incorporación resulta particularmente relevante debido a que en Imbabura se concentran varias de las experiencias de plantación, regeneración natural y manejo silvicultural analizadas en este capítulo. La información obtenida en Yuyucocha, Natabuela y otros sitios de la provincia proporciona, por tanto, evidencia local que puede contribuir a sustentar técnicamente la utilización de la especie dentro de la planificación forestal provincial (Paredes, 2014).

9.5.2. Plan Nacional de Restauración Ecológica con Enfoque de Paisaje 2025–2035

El Plan Nacional de Restauración Ecológica con Enfoque de Paisaje 2025–2035 (PNREP) representa un marco nacional para orientar la recuperación de ecosistemas y paisajes degradados. Su enfoque trasciende la reforestación entendida únicamente como establecimiento de árboles e incorpora las dimensiones ecológica, social, cultural y productiva del paisaje, reconociendo la necesidad de adaptar las intervenciones a las características de los diferentes ecosistemas del Ecuador continental.

Aunque el instrumento no identifica específicamente a *J. neotropica* entre sus lineamientos generales, varias de las modalidades de restauración que establece son directamente aplicables a la especie cuando existe correspondencia ecológica con el ecosistema de referencia. Entre ellas se encuentra la **regeneración natural asistida**, concebida como un conjunto de intervenciones destinadas a potenciar los procesos naturales de recuperación mediante la reducción de perturbaciones y de factores que limitan el desarrollo de los individuos establecidos naturalmente. Este enfoque guarda correspondencia con las prácticas de protección y manejo de la regeneración de *J. neotropica* analizadas en la sección 9.4.

El PNREP contempla además el **enriquecimiento vegetativo**, principalmente mediante especies nativas, así como el mejoramiento de sistemas antrópicos mediante agroforestería, sistemas silvopastoriles y restauración en mosaico. Estas modalidades proporcionan un marco de política pública aplicable a experiencias de *J. neotropica* como el enriquecimiento de bosques secundarios, los sistemas agroforestales y las plantaciones orientadas a restauración.

Particular relación con la silvicultura de la especie presenta la importancia atribuida por el Plan a las **fuentes semilleras**. El PNREP reconoce la necesidad de seleccionar poblaciones y árboles que proporcionen material con adecuada calidad genética, fisiológica y sanitaria, priorizando material local adaptado a las condiciones del sitio. Este principio coincide con los resultados de los ensayos de procedencias y progenies de *J. neotropica* y con la necesidad de conservar una base genética amplia en las intervenciones de restauración.

Este Plan, igualmente valida la **nucleación o establecimiento en bloques** como una estrategia mediante la cual agrupaciones densas de vegetación pueden actuar como focos de recuperación y favorecer posteriormente la expansión de la vegetación hacia sectores adyacentes. Este enfoque presenta correspondencia con las experiencias experimentales multiespecíficas descritas previamente en este capítulo, en las cuales *J. neotropica* ha sido incorporada junto con otras especies nativas.

Otro aporte relevante del PNREP corresponde al seguimiento. El instrumento plantea que la evaluación de la restauración debe trascender la superficie intervenida e incorporar indicadores relacionados con supervivencia, regeneración de la vegetación, recuperación de biodiversidad, almacenamiento de carbono y regulación hídrica. En consecuencia, futuras intervenciones de restauración con *J. neotropica* deberían evaluar no solamente la supervivencia y crecimiento individual de los árboles, sino también su contribución a la recuperación estructural y funcional del ecosistema y del paisaje (Ministerio del Ambiente, (2019); Ministerio de Energía y Ambiente, 2025b).

9.5.3. Estrategia Forestal Sostenible del Ecuador 2026–2050

La Estrategia Forestal Sostenible del Ecuador 2026–2050 constituye un instrumento de planificación estratégica de largo plazo para el sector forestal nacional. Fue formulada conjuntamente por el Ministerio de Ambiente y Energía, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca y el Ministerio de Producción, Comercio Exterior e Inversiones, con asistencia técnica de la FAO. Su horizonte de 25 años responde a la necesidad de incorporar en la planificación pública los períodos prolongados propios de los procesos forestales, incluidos el crecimiento de las plantaciones, la restauración y la recuperación de los servicios ecosistémicos.

Para la silvicultura de *J. neotropica* resultan particularmente pertinentes las líneas relacionadas con **restauración forestal, plantaciones forestales y sistemas agroforestales**. En materia de restauración, la EFSE plantea promover procesos naturales y asistidos, priorizar especies nativas en áreas de importancia ecológica e incorporar criterios de paisaje, gobernanza participativa, inclusión social y resiliencia climática.

Respecto de las plantaciones forestales, la Estrategia reconoce la necesidad de diversificar las especies utilizadas, incluyendo especies nativas, mejorar las tecnologías silviculturales y orientar las plantaciones tanto hacia la producción de materias primas como hacia la generación de servicios ambientales. Este planteamiento genera un marco favorable para especies nativas multipropósito como *J. neotropica*, cuya utilización puede articular producción forestal, conservación genética, recuperación ecológica y provisión de productos no madereros.

La EFSE reconoce asimismo la importancia de los **sistemas agroforestales** para integrar producción, conservación de biodiversidad, restauración ecológica y provisión de servicios ecosistémicos, así como para reducir la presión sobre los bosques naturales e incrementar la resiliencia climática. Este enfoque resulta consistente con la incorporación del nogal andino en sistemas agroforestales de la región andina, desarrollada específicamente en el capítulo correspondiente de esta monografía.

La relevancia de la Estrategia para *J. neotropica* debe interpretarse, por tanto, desde su marco general de política forestal y **no como una priorización nominal de la especie**. Su principal aporte consiste en crear condiciones de política pública para incrementar la participación de especies forestales nativas en plantaciones, restauración y sistemas productivos diversificados (Ministerio de Ambiente y Energía, et al., 2026).

9.5.4. Norma de Semillas Forestales y calidad genética del material reproductivo

La disponibilidad de material reproductivo de procedencia y calidad conocida constituye un componente fundamental para el establecimiento de plantaciones, restauración ecológica y conservación de los recursos genéticos de *J. neotropica*. En Ecuador, este componente cuenta con un antecedente normativo específico en la **Norma de Semillas Forestales**, promulgada mediante Acuerdo Ministerial No. 003 y publicada en el Registro Oficial No. 269 del 16 de enero de 2004.

La Norma tiene como propósito fomentar la producción, investigación, comercialización, promoción y utilización de semillas forestales de procedencia y calidad conocida y contribuir al mantenimiento de las reservas genéticas del país, con particular consideración de las especies forestales nativas (Ministerio del Ambiente, 2004). Desde esta perspectiva, su alcance trasciende la regulación de la semilla como insumo para plantaciones y se vincula directamente con la conservación y manejo de la diversidad genética forestal.

Para *J. neotropica*, este marco adquiere especial relevancia debido a la variación genética y fenotípica documentada entre poblaciones, procedencias, familias e individuos. La utilización de semillas de origen desconocido limita la trazabilidad genética del material establecido y dificulta la interpretación posterior de las diferencias de adaptación, crecimiento, forma y sanidad. Por el contrario, la identificación y manejo de fuentes semilleras de procedencia conocida permiten relacionar la producción de plantas con objetivos de conservación, restauración y mejoramiento genético.

La orientación establecida por la Norma presenta además correspondencia con los instrumentos de restauración formulados posteriormente. El PNREP reconoce como fuentes semilleras los bosques naturales, plantaciones, rodales o conjuntos de árboles seleccionados para producir semillas con adecuada calidad genética, fisiológica y sanitaria, y plantea la identificación y protección de árboles madre y poblaciones locales adaptadas como parte de las estrategias de restauración.

Para *J. neotropica*, los ensayos de procedencias y progenies descritos en este capítulo, conjuntamente con la identificación de árboles fenotípicamente sobresalientes y poblaciones naturales o plantadas con potencial semillero, proporcionan una base científica para avanzar desde la recolección circunstancial de frutos hacia un sistema de abastecimiento de semillas con **identidad de origen, trazabilidad y criterios de calidad**.

Esta necesidad adquiere mayor importancia ante la ampliación de los programas nacionales de restauración. El PNREP identifica entre las limitaciones existentes la insuficiente disponibilidad y diversidad de material vegetal nativo y reconoce la necesidad de fortalecer su producción para responder a las demandas de restauración ecológica.

En consecuencia, la producción de semillas de *J. neotropica* no debería entenderse únicamente como una fase previa a la propagación, sino como parte de una **cadena de conservación y manejo genético** que comprende la identificación y caracterización de

las fuentes, documentación de la procedencia, recolección y manejo de semillas, evaluación de su calidad, producción de plantas y seguimiento del desempeño del material establecido en campo.

9.5.5. Articulación de los instrumentos de política pública con la silvicultura de *J. neotropica*

Los instrumentos analizados operan en escalas, horizontes temporales y niveles normativos diferentes, pero complementarios. El Plan de Forestación y Reforestación de Imbabura constituye un instrumento territorial en el cual *J. neotropica* se encuentra explícitamente reconocida entre las especies consideradas para intervención; la Norma de Semillas Forestales proporciona un marco específico para la procedencia, calidad y conservación genética del material reproductivo; el PNREP 2025–2035 establece el marco nacional para la restauración ecológica con enfoque de paisaje; y la EFSE 2026–2050 integra restauración, plantaciones forestales y sistemas agroforestales dentro de una política forestal nacional de largo plazo.

La relación entre estos instrumentos y la especie puede interpretarse como una secuencia complementaria que comprende **calidad y procedencia del material reproductivo, establecimiento y manejo territorial, restauración de ecosistemas y paisajes, y planificación forestal nacional de largo plazo**. Esta articulación proporciona un marco favorable para trasladar progresivamente los resultados de investigación sobre *J. neotropica* hacia programas y proyectos de mayor escala.

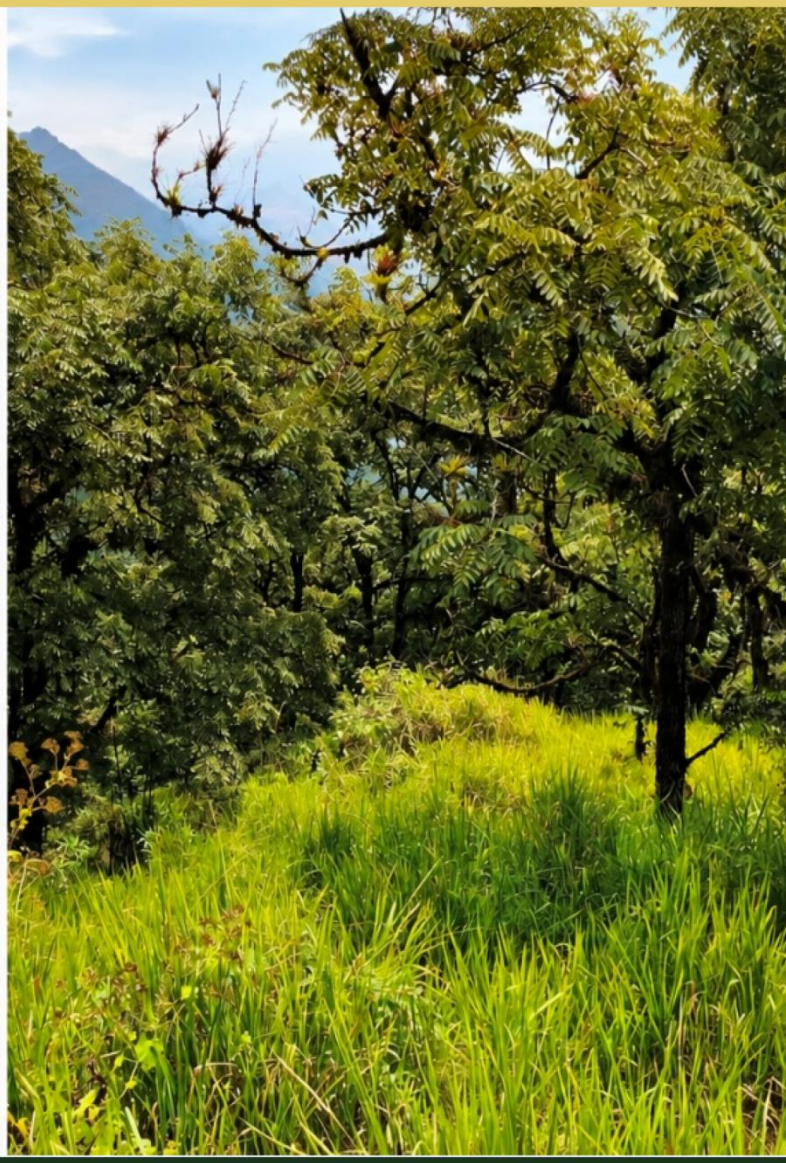
No obstante, la incorporación de la especie en estos procesos debe sustentarse en criterios ecológicos y no solamente en su condición de especie nativa o de interés para la conservación. La selección de *J. neotropica* para restauración debe responder a su correspondencia con el ecosistema de referencia, las condiciones edafoclimáticas del sitio, el objetivo de la intervención y la procedencia del material utilizado. Por tanto, su empleo no debería generalizarse indiscriminadamente a todos los ecosistemas o paisajes incluidos en los instrumentos nacionales.

La evidencia silvicultural reunida en este capítulo proporciona elementos para avanzar desde la elegibilidad general de la especie hacia **prescripciones técnicamente sustentadas**. La selección del sitio, procedencia y calidad del material vegetal, diseño de la plantación, acondicionamiento del micrositio, manejo nutricional e hídrico, control de la competencia y manejo de la regeneración natural constituyen componentes que deben integrarse en la planificación de las intervenciones con *J. neotropica*.

La articulación entre investigación y política pública adquiere particular importancia frente a la necesidad nacional de disponer de material vegetal nativo suficiente, diverso y de calidad para los programas de restauración. En este contexto, las investigaciones ecuatorianas sobre fuentes semilleras, procedencias, progenies, propagación, establecimiento, fertilización y regeneración natural de *J. neotropica* pueden contribuir a reducir brechas de conocimiento y proporcionar bases técnicas para la producción de material reproductivo y el diseño de intervenciones adaptadas a diferentes condiciones ambientales.

En conjunto, el marco de política pública vigente permite situar la silvicultura de *J. neotropica* dentro de una perspectiva que trasciende el establecimiento de árboles individuales o plantaciones aisladas. La especie presenta posibilidades de incorporación en **plantaciones forestales diversificadas, restauración ecológica, regeneración natural asistida, enriquecimiento de bosques secundarios, conectividad de paisajes y sistemas agroforestales**, siempre bajo criterios de correspondencia ecológica, procedencia conocida, diversidad genética, adaptación local y seguimiento de resultados. De esta manera, el conocimiento científico y silvicultural generado sobre el nogal andino puede contribuir a la implementación territorial de las actuales políticas forestales y de restauración del Ecuador.

CAPÍTULO 10



Sistemas agroforestales con *Juglans neotropica*

Capítulo

10

Sistemas agroforestales con *Juglans neotropica*

A) Sistema agroforestal de *Juglans neotropica* asociado con café (*Coffea arabica*), variedad Caturra Rojo, en Pimampiro, Imbabura, Ecuador. **B)** Sistema silvopastoril de *J. neotropica* asociado con pasto chilena (*Megathyrsus maximus*) en El Tocte, parroquia La Victoria, cantón Macará, Loja, Ecuador. Fotografía A: Mario Añazco; fotografía B: Augusto Pinzón.

Los sistemas agroforestales integran deliberadamente componentes leñosos perennes con cultivos agrícolas y/o producción pecuaria dentro de una misma unidad de manejo, mediante arreglos espaciales o temporales que generan interacciones entre sus componentes. En Ecuador, *Juglans neotropica* se encuentra incorporada tanto en sistemas tradicionales como en arreglos agroforestales establecidos con fines productivos, de protección y diversificación.

El presente capítulo analiza la participación de *J. neotropica* en estos sistemas a partir de dos criterios complementarios. El primero corresponde a la **clasificación según los componentes que integran el sistema agroforestal** (Tsufac et al., 2021), mediante la cual se distinguen:

- **Sistemas agrosilvícolas:** asociación del componente arbóreo, en este caso *J. neotropica*, con cultivos agrícolas perennes, semiperennes o de ciclo corto.
- **Sistemas silvopastoriles:** integración del componente arbóreo con pasturas, especies forrajeras y producción pecuaria.
- **Sistemas agrosilvopastoriles:** combinación simultánea de árboles, cultivos agrícolas, pasturas o forrajes y animales dentro de una misma unidad productiva.

El segundo criterio corresponde a la **organización jerárquica de los sistemas agroforestales**, según la cual un sistema puede estar constituido por diferentes prácticas agroforestales y estas, a su vez, por técnicas específicas de establecimiento y manejo. Esta diferenciación permite analizar a *J. neotropica* no solamente por las especies con las cuales se encuentra asociada, sino también por su disposición espacial, función y manejo dentro de cada arreglo.

A partir de estos criterios, el capítulo examina inicialmente la presencia de *J. neotropica* en la chacra andina como expresión de los sistemas agroforestales tradicionales y, posteriormente, su incorporación en sistemas agrosilvícolas, silvopastoriles y agrosilvopastoriles contemporáneos. Se consideran prácticas y configuraciones como linderos, cortinas rompevientos, árboles dispersos, bosquetes, arreglos multiestrato y plantaciones lineales multipropósito, documentadas principalmente en localidades de la región andina del Ecuador.

10.1. La chacra andina como sistema agroforestal tradicional

La chacra o huerto agroforestal constituye uno de los espacios tradicionales en los que se registra la presencia de *J. neotropica* en los Andes ecuatorianos. En estos sistemas, el nogal forma parte del componente arbóreo y se integra con especies agrícolas, frutales y otras plantas de uso familiar, cumpliendo funciones productivas y ecológicas dentro de la unidad de manejo (Ministerio de Agricultura y Ganadería et al., 2022).

En sistemas tradicionales de la Sierra ecuatoriana, desde los valles interandinos hasta sectores montanos húmedos, los árboles pueden encontrarse próximos a viviendas, acequias, caminos, bordes de parcelas y linderos. Esta disposición permite incorporar el componente arbóreo sin ocupar necesariamente la superficie central destinada a los cultivos y genera diferentes condiciones de cobertura y sombra dentro del predio (Tsufac et al., 2021).

La presencia de árboles en sistemas agroforestales también incorpora biomasa aérea y subterránea y genera aportes periódicos de hojarasca y otros residuos vegetales al suelo. Estos procesos intervienen en el reciclaje de nutrientes, el aporte de materia orgánica y la cobertura superficial del suelo. No obstante, la magnitud de estos efectos depende de factores como la densidad y edad de los árboles, las especies asociadas, las condiciones edáficas y climáticas y el manejo aplicado; por tanto, no deben atribuirse valores cuantitativos específicos a *J. neotropica* mientras no se disponga de mediciones realizadas para el sistema considerado.

Además de su participación como componente arbóreo, *J. neotropica* proporciona productos utilizados por las familias rurales. Entre ellos se encuentran las nueces comestibles, caracterizadas por su contenido de aceites y proteínas (Toro Vanegas et al., 2018; Vilcacundo et al., 2018), y la madera utilizada en carpintería (Yamberla, 2023). Los frutos también forman parte de preparaciones alimentarias tradicionales documentadas en la región andina (Toro Vanegas et al., 2018).

La composición de las chacras varía de acuerdo con las condiciones ecológicas, los objetivos productivos y las prácticas de manejo familiar. Entre las asociaciones documentadas se encuentra la presencia de *J. neotropica* junto con maíz (*Zea mays*), fréjol (*Phaseolus vulgaris*) y sambo (*Cucurbita ficifolia*) (Ministerio de Agricultura y Ganadería et al., 2022).

La coexistencia de especies con diferentes hábitos de crecimiento y requerimientos permite establecer complementariedades funcionales dentro del sistema. El fréjol, como leguminosa, participa en procesos de fijación biológica de nitrógeno mediante su asociación con microorganismos simbióticos; el maíz ocupa principalmente el estrato herbáceo vertical; y el sambo desarrolla una cobertura rastrera sobre la superficie del suelo (Fonteyne et al., 2023). Estas características permiten utilizar distintos estratos y espacios de la parcela.

La asociación maíz–fréjol–cucurbitáceas presenta similitudes estructurales y funcionales con sistemas tradicionales de policultivo documentados en América Latina, entre ellos la milpa mesoamericana. Sin embargo, esta comparación debe entenderse desde la complementariedad entre componentes y no como equivalencia entre sistemas, debido a sus diferencias ecológicas, culturales y de manejo (Fonteyne et al., 2023).

En otras chacras andinas, *J. neotropica* se encuentra asociada con especies como el camote (*Ipomoea batatas*) y otros cultivos locales. La coexistencia de un estrato arbóreo con especies herbáceas y rastreras permite ocupar diferentes niveles verticales y horizontales dentro de la unidad productiva (Tsufac et al., 2021). Un ejemplo de este tipo de asociación se observa en Natabuela, Imbabura, donde el nogal forma parte de una chacra con camote (Figura 10.1).

Figura 10.1

Vista parcial de una chacra andina con Juglans neotropica en asociación con camote (Ipomoea batatas), Natabuela, Imbabura, Ecuador

Nota. *J. neotropica* constituye el componente arbóreo del sistema, mientras que *I. batatas* ocupa el estrato herbáceo–rastrero y contribuye a la cobertura del suelo.

La presencia del nogal en estas unidades productivas muestra que su incorporación a sistemas agroforestales no constituye exclusivamente una práctica reciente. Su permanencia en chacras, huertos familiares y bordes de parcelas constituye un antecedente para comprender los arreglos agroforestales en los que actualmente se maneja la especie en diferentes localidades de la región andina ecuatoriana.

10.2. Integración de *J. neotropica* en sistemas agroforestales contemporáneos

Además de su presencia en chacras y huertos tradicionales, *J. neotropica* se encuentra incorporada en diferentes arreglos agroforestales establecidos en áreas rurales, urbanas y periurbanas del Ecuador. Estos sistemas presentan variaciones en composición, densidad, distribución espacial y manejo del componente arbóreo, de acuerdo con los objetivos productivos y las condiciones del sitio.

Desde el punto de vista estructural, el nogal puede establecerse en disposición lineal, como ocurre en linderos, cortinas rompevientos, cercas vivas y plantaciones

lineales multipropósito, o distribuirse dentro de las parcelas en asociación con cultivos permanentes, semipermanentes, anuales, temporales y de ciclo corto. También forma parte de arreglos multiestrato, en los cuales especies de diferente porte y ciclo productivo ocupan distintos niveles verticales y temporales del sistema.

Para su análisis, los arreglos documentados en este capítulo se organizan de acuerdo con los componentes asociados en tres categorías: **sistemas agrosilvícolas, sistemas silvopastoriles y sistemas agrosilvopastoriles**. Dentro de cada categoría se diferencian las principales prácticas agroforestales observadas y documentadas en Ecuador, así como sus características de composición, establecimiento y manejo.

La evaluación de las interacciones se sustenta, cuando existe información disponible, en variables cuantitativas relacionadas con estructura, espaciamiento, crecimiento, diversidad biológica y condiciones microclimáticas. Cuando no se dispone de mediciones específicas para *J. neotropica*, los efectos ecológicos se interpretan como funciones potenciales o como respuestas documentadas para el sistema agroforestal en su conjunto, evitando atribuir a la especie efectos que no hayan sido medidos directamente. Esta distinción es particularmente importante en los arreglos multiespecíficos, donde las respuestas observadas resultan de la interacción conjunta de los diferentes componentes del sistema.

10.2.1. Sistemas agrosilvícolas con *J. neotropica*

Los sistemas agrosilvícolas considerados en este capítulo corresponden a arreglos en los cuales *J. neotropica* se encuentra asociada con cultivos agrícolas de ciclo corto, semiperennes o perennes. Entre las principales prácticas documentadas se incluyen linderos asociados con cultivos agrícolas, cercas mixtas, cortinas rompevientos, asociaciones con café, asociación con cultivos anuales, arreglos multiestrato con cultivos de ciclo diferenciado y plantaciones lineales multipropósito.

Estas prácticas difieren en la distribución espacial y densidad del nogal, composición de especies, estratificación y objetivos de manejo. Por esta razón, se analizan separadamente, diferenciando los registros y mediciones obtenidos directamente en sistemas que contienen *J. neotropica* de la información agroforestal utilizada como referencia para interpretar sus interacciones.

10.2.1.1. J. neotropica en linderos

Los linderos constituyen una práctica agroforestal en la que los árboles se disponen principalmente sobre los límites de las unidades productivas. Además de contribuir a la delimitación de los predios, esta configuración permite incorporar el componente arbóreo manteniendo la mayor parte de la superficie interior destinada a cultivos agrícolas. Esta práctica ha sido documentada desde hace varias décadas en la Sierra ecuatoriana, particularmente en pequeñas propiedades agrícolas, donde los límites del predio constituyen espacios estratégicos para el establecimiento de árboles sin reducir significativamente el área destinada a la producción agrícola. Carlson & Añazco (1990) ya mencionaban al nogal entre las especies utilizadas en linderos en la región andina del Ecuador.

En Pimampiro, Yaguache Ordóñez & Carrión Puglla (2004) documentaron posteriormente al nogal entre las especies arbóreas utilizadas en linderos y señalaron que esta modalidad constituía una de las prácticas de mayor aplicación por las familias campesinas del cantón. Los autores registraron específicamente linderos con nogal en la comunidad Los Árboles. En diferentes localidades de la Sierra norte del Ecuador se ha registrado *J. neotropica* en linderos asociados con cultivos de ciclo corto, semiperennes y perennes. Entre los cultivos observados en estos arreglos se encuentran maíz (*Zea mays*), fréjol (*Phaseolus vulgaris*) y pimiento (*Capsicum annuum*). En asociaciones con cultivos de mayor permanencia se registra granadilla (*Passiflora ligularis*), aguacate (*Persea americana*) y otros componentes agrícolas. En algunos sistemas documentados en Imbabura, los individuos de nogal presentan separaciones de aproximadamente 2–4 m dentro de la línea de plantación, aunque esta distancia varía de acuerdo con la edad de los árboles, el cultivo asociado y los objetivos de manejo. La Figura 10.2 muestra la permanencia de esta práctica en la comunidad Los Árboles, mediante un lindero de nogal asociado actualmente con un cultivo de granadilla.

Figura 10.2

Lindero de Juglans neotropica asociado con granadilla (Passiflora ligularis) en la comunidad Los Árboles, Pimampiro, Imbabura, Ecuador

Nota. Individuos adultos de *J. neotropica* establecidos en disposición lineal en el límite de una parcela cultivada con granadilla.

La disposición lineal incorpora un componente arbóreo vertical en los bordes de la matriz agrícola. Sus interacciones con los cultivos adyacentes dependen, entre otros factores, de la continuidad y orientación del lindero, la distancia entre individuos, las dimensiones de las copas y las prácticas de manejo. Por esta razón, modificaciones del microclima, incorporación de materia orgánica, almacenamiento de carbono o provisión de hábitat deben evaluarse en función de las características particulares de cada arreglo y no atribuirse de manera uniforme a la presencia del nogal.

Linderos asociados con caminos rurales

En los paisajes agropecuarios de la Sierra ecuatoriana, los linderos arbóreos pueden coincidir espacialmente con caminos o carreteros rurales, de manera que una misma alineación cumple funciones relacionadas con la delimitación del predio y la definición del borde de la vía**.** Esta disposición permite mantener el componente arbóreo fuera del área principal de cultivo y puede proporcionar sombra y contribuir al paisaje del entorno rural**.** Este arreglo constituye una práctica agroforestal cuando la hilera arbórea forma parte funcional de la unidad productiva y se encuentra espacialmente asociada con sus componentes agrícolas.

Esta modalidad se observa en la comunidad Los Árboles, en Pimampiro, donde individuos adultos de *J. neotropica* forman una hilera en el límite de una parcela cultivada con granadilla y, simultáneamente, acompañan el trazado de un camino rural. En este arreglo, la alineación arbórea cumple una función de delimitación del predio, mientras que su ubicación junto al camino aporta sombra y contribuye a la configuración del paisaje agrícola. La Figura 10.3 muestra la disposición espacial del lindero respecto al camino y su asociación con el cultivo de granadilla.

Figura 10.3

Lindero de Juglans neotropica asociado con un camino rural y cultivo de granadilla en la comunidad Los Árboles, Pimampiro, Imbabura, Ecuador

Nota. Hilera de *J. neotropica* establecida en el límite de una parcela agropecuaria y paralela a un camino rural.

Interacciones estructurales con especies trepadoras

En sistemas agroforestales observados en el norte de los Andes ecuatorianos se registra también el uso de individuos de *J. neotropica* como soporte físico de especies trepadoras o rastreras de interés alimentario, entre ellas taxo (*Passiflora tarminiana*), granadilla (*Passiflora ligularis*), sambo (*Cucurbita ficifolia*) y zapallo (*Cucurbita maxima*).

Estas especies pueden utilizar el tronco y las ramas del nogal como soporte mecánico sin establecer una relación parasítica directa. Desde el punto de vista estructural, esta interacción constituye una modalidad de utilización vertical del espacio, cuya compatibilidad depende de la intensidad con que la especie trepadora ocupa el fuste y la copa. Un ejemplo de esta interacción se observa en la Figura 10.4, donde una especie trepadora utiliza un individuo de *J. neotropica* como soporte dentro del arreglo agroforestal.

Una cobertura excesiva y persistente puede modificar la disponibilidad de luz y la aireación de la copa e incrementar la carga mecánica sobre las ramas. Cuando estas asociaciones se mantienen deliberadamente, requieren regulación periódica de la biomasa trepadora, particularmente cuando el objetivo de manejo del nogal incluye la producción de frutos o la formación de fustes destinados a madera.

Figura 10.4

Juglans neotropica utilizado como soporte por sambo (Cucurbita ficifolia) en un sistema agroforestal de Cahuasquí, Imbabura, Ecuador

Nota. La especie trepadora utiliza el fuste y las ramas de *J. neotropica* como soporte físico, ejemplificando el aprovechamiento vertical del espacio dentro del sistema agroforestal.

10.2.1.2. J. neotropica en cercas mixtas

Las cercas mixtas constituyen una práctica agroforestal lineal en la que diferentes especies leñosas se disponen en los límites de las parcelas y se integran con los componentes agrícolas del sistema. A diferencia de los linderos conformados predominantemente por una especie arbórea, estas configuraciones se caracterizan por la presencia conjunta de varias especies forestales y arbustivas, que pueden cumplir funciones de delimitación y complementar la producción agrícola de la finca.

En la parroquia Cahuasquí, cantón Urcuquí, provincia de Imbabura, Fuentes (2016) documentó la presencia de *J. neotropica* en cercas mixtas como parte de la caracterización de los sistemas agroforestales locales. De las 19 prácticas caracterizadas, el estudio identificó sistemas agrosilvícolas, silvopastoriles y agrosilvopastoriles; dentro de los primeros, las cercas mixtas constituyeron la práctica predominante. Estas cercas estaban conformadas por diferentes especies forestales y arbustivas dispuestas alrededor de las áreas de cultivo.

Dentro de la composición leñosa de las cercas mixtas, *J. neotropica* representó el **5,6 %** de los registros de especies forestales y arbustivas. El nogal compartió estas configuraciones con especies como lechero (*Euphorbia laurifolia*), espino (*Vachellia macracantha*), sauce (*Salix alba*), eucalipto (*Eucalyptus globulus*), chilca (*Baccharis latifolia*) y guaba (*Inga insignis*), entre otras.

Los registros individuales muestran que la especie formaba parte de cercas asociadas con distintos cultivos. Se documentaron, entre otras configuraciones, nogal con granadilla; nogal con tomate de árbol y pimiento; nogal con maíz; nogal con fréjol; y nogal en cercas vinculadas con espárrago. La composición arbórea y arbustiva también varió entre fincas, registrándose asociaciones del nogal con lechero, chilca, guaba, aguacate, sauce y eucalipto.

La presencia de *J. neotropica* en estas cercas evidencia una modalidad de integración del nogal en **sistemas agrosilvícolas diversificados**, distinta de los linderos monoespecíficos o de las plantaciones lineales multipropósito descritas en otros apartados de este capítulo. En este caso, el nogal constituye uno de varios componentes leñosos que coexisten espacialmente con cultivos agrícolas, configurando estructuras lineales multiespecíficas dentro de las fincas de Cahuasquí.

10.2.1.3. Cortina rompevientos multiespecífica de cuatro hileras en Yuyucocha, Imbabura

Las cortinas rompevientos constituyen una práctica agroforestal basada en el establecimiento de una o varias hileras de árboles, arbustos y otros componentes vegetales dispuestos para reducir la velocidad del viento y proteger cultivos, infraestructura y otras áreas productivas. Su funcionamiento depende de características como la orientación respecto de los vientos predominantes, altura, longitud, continuidad, número de hileras y porosidad de la barrera vegetal (Enescu et al., 2025; Li et al., 2022).

En el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, en Imbabura, se estableció una **cortina rompevientos multiespecífica de cuatro hileras**, en la cual *J.*

neotropica forma parte de un arreglo que combina especies de diferente porte y arquitectura. Esta configuración genera una estratificación vertical progresiva y permite integrar al nogal andino dentro de una práctica agroforestal destinada principalmente a la protección de las áreas productivas.

La hilera de mayor altura está constituida por *Casuarina equisetifolia*, cuyos individuos alcanzan aproximadamente **18–22 m**. La segunda hilera está conformada por *J. neotropica*, con alturas aproximadas de **12–15 m**. La tercera corresponde a *Vachellia macracantha*, que alcanza aproximadamente **6–8 m**, mientras que la cuarta y de menor altura está formada por *Furcraea andina*, con aproximadamente **2,5–3 m**. La combinación de estos componentes configura un perfil vertical diferenciado, desde el estrato arbóreo superior hasta un componente bajo próximo al nivel del cultivo.

Las distancias de establecimiento también difieren entre los componentes. *C. equisetifolia* presenta aproximadamente **2,0 m entre plantas**, *J. neotropica* **3,0 m**, *V. macracantha* **3,5 m** y *F. andina* **2,0 m**. Entre hileras se mantienen aproximadamente **2,0 m entre la primera y segunda**, **7,0 m entre la segunda y tercera** y **3,0 m entre la tercera y cuarta**, con una disposición alterna de los individuos.

Esta combinación de alturas, espaciamientos y arquitecturas vegetales genera una barrera multiestratificada en la que *J. neotropica* ocupa una posición intermedia entre el componente de mayor porte, representado por *C. equisetifolia*, y los estratos progresivamente menores de *V. macracantha* y *F. andina* (Figura 10.5). Además de la función principal de protección frente al viento, los componentes de la cortina aportan productos y funciones complementarias, entre ellos madera, frutos, fibras y otros recursos vegetales, así como estructura y hábitat para organismos asociados.

Figura 10.5

Cortina rompevientos multiespecífica con Juglans neotropica en el campus Yuyucocha, Imbabura, Ecuador

Nota. Vista de la estratificación vegetal de la cortina de cuatro hileras, integrada por *C. equisetifolia*, *J. neotropica*, *V. macracantha* y *F. andina*. La fotografía ilustra la disposición y el diferente porte de sus componentes; no representa una medición de la reducción de la velocidad del viento.

Esta experiencia muestra que la combinación de especies de diferente porte y arquitectura permite integrar a *J. neotropica* en una cortina rompevientos multiespecífica y combinar funciones de protección, producción y conservación. Aunque no se dispone de mediciones directas de la reducción de la velocidad del viento para este arreglo, su estructura multiestratificada constituye una experiencia de interés para el diseño y manejo de sistemas agroforestales en las condiciones de Yuyucocha**.**

10.2.1.4. J. neotropica asociada con café

La asociación de *J. neotropica* con *Coffea arabica* se encuentra documentada en diferentes sistemas agroforestales de Ecuador, particularmente en las provincias de Imbabura y Santo Domingo de los Tsáchilas. Las experiencias registradas presentan configuraciones contrastantes en composición, estructura, edad y trayectoria de establecimiento, desde asociaciones relativamente simples entre nogal y café hasta sistemas multiespecíficos y multiestratificados en los que *J. neotropica* constituye uno de varios componentes del dosel arbóreo.

Desde la perspectiva temporal, estas experiencias pueden diferenciarse de acuerdo con el momento en que se incorporan los componentes al sistema. Somarriba (2012) reconoce que los componentes agroforestales pueden estar asociados de forma **simultánea o secuencial** y señala que la consideración de los arreglos espacio-temporales resulta particularmente útil para la clasificación de las formas de uso de la tierra agroforestales. El autor precisa, además, que la producción de dos o más bienes o servicios en una misma unidad de tierra lleva implícita una dimensión espacio-temporal, por lo que la importancia de especificar estos arreglos radica principalmente en su utilidad para caracterizar y clasificar las formas de uso agroforestal.

Este criterio resulta particularmente apropiado para interpretar las experiencias de *J. neotropica* con café consideradas en este capítulo. En **Pimampiro, Yuyucocha y Natabuela**, así como en una parte de los lotes de **Cananvalle**, el establecimiento fue **secuencial**: los nogales y, según el sitio, otros componentes arbóreos se establecieron primero y el café fue incorporado posteriormente. En contraste, en **La Favorita** y en determinados lotes de **Cananvalle**, el establecimiento fue **simultáneo**, con la plantación de nogal y café durante la misma etapa de formación del sistema. Esta diferenciación permite analizar no solamente la composición actual de los arreglos, sino también su trayectoria de formación y la evolución de las relaciones espaciales entre los componentes.

Pimampiro: arreglo temporal secuencial nogal–café

En Pimampiro, provincia de Imbabura, se encuentra documentado un sistema constituido por *J. neotropica* asociada con *C. arabica* var. Caturra Rojo. A diferencia de los arreglos multiespecíficos de Yuyucocha y Cananvalle, presenta una composición arbóreo-agrícola relativamente simple, lo que permite reconocer con mayor claridad la relación espacial entre el nogal y el café.

El sistema corresponde a un **arreglo temporal secuencial**, en el cual el componente arbóreo fue establecido previamente y el café se incorporó posteriormente. Esta trayectoria determina que los cafetos se desarrollen dentro de una estructura arbórea

cuya altura, diámetro y cobertura de copa aumentan progresivamente con la edad. La secuencia fotográfica disponible entre 2011 y 2025 documenta la evolución estructural del sistema durante este período y permite observar los cambios progresivos en la relación espacial entre el componente arbóreo y el café (Figura 10.6).

Figura 10.6

Evolución temporal de un sistema agroforestal secuencial de Juglans neotropica y café en Pimampiro, Imbabura, Ecuador

Nota. Secuencia fotográfica correspondiente a los años 2011, 2013, 2015, 2017 y 2025, que documenta la evolución estructural del sistema agroforestal y el desarrollo del café bajo un componente arbóreo de *J. neotropica* previamente establecido.

La investigación de Oyos (2019) constituye una fuente específica para la caracterización de esta asociación. Por ello, los indicadores productivos, estructurales o ambientales atribuidos al arreglo nogal–café deben corresponder a variables efectivamente evaluadas en dicha investigación, evitando extrapolar al sistema respuestas documentadas para otros cafetales bajo sombra.

Yuyucocha: arreglo secuencial multiespecífico y multiestratificado con café

En el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, *J. neotropica* forma parte de un sistema agrosilvícola multiespecífico y multiestratificado con café. Su establecimiento responde también a una trayectoria **secuencial**, debido a que el componente arbóreo precedió a la incorporación del café. A diferencia de Pimampiro, sin embargo, el nogal forma parte de un conjunto forestal considerablemente más diverso.

El componente agrícola incluye tres variedades de *C. arabica*: **Caturra Rojo, Bourbon Sidra y SL28**, mientras que el componente arbóreo comprende **27 especies forestales**, entre ellas *J. neotropica*. Los registros del Programa *Juglans* documentan aproximadamente **7–10 individuos de nogal de diferentes edades** dentro del sistema.

La coexistencia de especies forestales con diferentes arquitecturas y dimensiones genera varios niveles de ocupación vertical. Los cafetos ocupan principalmente los estratos inferiores del componente leñoso, mientras que las especies forestales se distribuyen en posiciones intermedias y superiores. En *J. neotropica*, la presencia de individuos de diferentes edades introduce variación adicional en altura, diámetro y desarrollo de copa.

La estructura multiestratificada observada en Yuyucocha es consistente con otros sistemas agroforestales cafetaleros documentados en Ecuador. En la provincia de Loja, Valarezo Manosalvas et al. (2026) describen sistemas agrosilvícolas de café conformados por un estrato superior de especies arbóreas, un estrato medio integrado por café, frutales y otros componentes arbustivos, y un estrato inferior con cultivos asociados. Esta organización vertical permite integrar funciones productivas y ecológicas dentro de una misma unidad de manejo y constituye un referente comparativo para interpretar la diversidad estructural de los sistemas cafetaleros en los que participa *J. neotropica*.

Las mediciones microclimáticas realizadas por Ayala & Torres (2025) registraron una temperatura media de 20,82 °C dentro del sistema agroforestal y 22,02 °C fuera de este, equivalente a una diferencia de 1,20 °C. La humedad relativa media alcanzó 67,12 % dentro y 63,56 % fuera, con una diferencia de 3,56 puntos porcentuales. Estos resultados evidencian condiciones microclimáticas distintas entre el interior y el exterior del arreglo. Sin embargo, debido a su composición multiespecífica, tales diferencias representan el efecto integrado del dosel agroforestal y no pueden atribuirse exclusivamente a *J. neotropica*. La estructura del sistema y la coexistencia del nogal con los cafetos en los estratos inferiores se ilustran en la Figura 10.7.

Figura 10.7

Juglans neotropica como componente arbóreo de un sistema agroforestal multiestratificado con Coffea arabica en Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador

Nota. Individuos adultos de *J. neotropica* asociados con cafetos en producción, que ocupan un estrato inferior dentro del arreglo multiestratificado. El sistema incluye *C. arabica* var. Caturra Rojo, Bourbon Sidra y SL28 y un componente arbóreo constituido por 27 especies forestales.

Natabuela: arreglo temporal secuencial nogal–café

En Natabuela, provincia de Imbabura, se ha establecido otra experiencia de asociación entre *J. neotropica* y café en el marco de las investigaciones y actividades de campo vinculadas al Programa *Juglans*. Al igual que en Pimampiro y Yuyucocha, su trayectoria corresponde a un **arreglo temporal secuencial**, debido a que el componente arbóreo fue establecido antes de la incorporación del café.

Esta experiencia amplía la evidencia disponible sobre la posibilidad de incorporar *C. arabica* en áreas donde el nogal ya ha iniciado su desarrollo. Desde una perspectiva estructural, la secuencia de establecimiento implica que el café se incorpora bajo condiciones determinadas parcialmente por árboles preexistentes, cuya influencia sobre la ocupación del espacio y la disponibilidad de radiación cambia progresivamente conforme se desarrollan las copas.

La experiencia de Natabuela resulta también relevante porque demuestra que el arreglo secuencial nogal–café no corresponde a un caso aislado de Pimampiro, sino que ha sido utilizado en diferentes condiciones locales de Imbabura. No obstante, las respuestas productivas y microclimáticas de cada sistema deben evaluarse individualmente y no pueden inferirse únicamente a partir de la semejanza en su secuencia de establecimiento.

Como reflejo de esta replicabilidad, Alvarez (2025) documentó y evaluó formalmente este escenario de Natabuela como un modelo experimental estructurado. Su investigación analiza la respuesta adaptativa y el crecimiento inicial de tres variedades de *Coffea arabica* L. bajo el dosel preexistente de *J. neotropica*, consolidando este arreglo secuencial no solo como una práctica empírica, sino como un modelo técnico estandarizado y reproducible para la región.

Cananvalle: arreglos temporales secuenciales y simultáneos

Cananvalle constituye el caso de mayor diversidad temporal entre las experiencias analizadas, debido a que dentro de una misma localidad existen lotes establecidos mediante arreglos secuenciales y simultáneos. En determinados lotes, el componente arbóreo precedió al establecimiento del café; en otros, *J. neotropica* y los cafetos fueron plantados durante la misma etapa de formación del sistema.

El componente agrícola presenta, además, una elevada diversidad varietal, con siete variedades registradas de *C. arabica*: **Geisha, Caturra Rojo, Bourbon Rosado, Ethiopia, Moca, Colombia Mejorado y Bourbon Sidra**. Esta composición ha sido documentada mediante actividades de campo desarrolladas en el marco del Programa de Investigación *Juglans* y de la cooperación entre Cananvalle y la Universidad Técnica del Norte.

Los cafetos se encuentran asociados con especies frutales, entre ellas *Persea americana*, y diferentes especies forestales, incluida *J. neotropica*. El sistema presenta, por tanto, diversidad interespecífica —por la coexistencia de componentes forestales, frutales y agrícolas— e intraespecífica dentro del componente café, representada por las

siete variedades registradas. Una de estas asociaciones, correspondiente a *J. neotropica* con *C. arabica* var. Geisha, se muestra en la Figura 10.8.

Figura 10.8

Juglans neotropica asociada con Coffea arabica var. Geisha en Cananvalle, Imbabura, Ecuador

Nota. Asociación de *J. neotropica* con *C. arabica* var. Geisha dentro de uno de los arreglos agroforestales de Cananvalle. La variedad Geisha forma parte de las siete variedades de café registradas en esta localidad.

La coexistencia de arreglos secuenciales y simultáneos convierte a Cananvalle en una experiencia particularmente interesante para interpretar la trayectoria de formación de los sistemas nogal–café. En los primeros, el café se incorpora dentro de una estructura arbórea previamente establecida; en los segundos, ambos componentes inician conjuntamente su desarrollo. Sin embargo, esta diferencia temporal no permite asumir por sí sola ventajas productivas o ecológicas de una modalidad sobre otra, pues sus resultados dependen también de la densidad y distribución de los árboles, arquitectura de las copas, variedades de café, condiciones ambientales y manejo.

La Favorita: arreglo temporal simultáneo nogal–café

En la Estación Experimental La Favorita, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, se estableció, en el marco del Programa *Juglans*, una experiencia agroforestal

en la que *J. neotropica* y café fueron incorporados **simultáneamente**. A diferencia de Pimampiro, Natabuela y Yuyucocha, donde el café se introdujo después del establecimiento del componente arbóreo, en La Favorita ambos componentes iniciaron su desarrollo durante la misma etapa de formación del sistema.

Esta modalidad genera una trayectoria estructural diferente. Desde las etapas iniciales, nogal y café comparten el espacio y desarrollan simultáneamente sus componentes aéreos y radicales. Conforme aumenta el porte de *J. neotropica*, se modifica progresivamente la diferenciación vertical entre el componente forestal y el agrícola. La experiencia permite, por tanto, documentar una vía alternativa para la conformación de sistemas agroforestales nogal–café, particularmente relevante para áreas donde ambos componentes se incorporan desde el inicio de la intervención.

Por tratarse de un sistema establecido con fines de investigación y seguimiento dentro del Programa *Juglans*, su valor actual reside principalmente en la posibilidad de documentar la evolución conjunta de ambos componentes. Las comparaciones futuras con sistemas secuenciales deberán considerar no solamente el momento de establecimiento, sino también las diferencias ambientales, densidades, material vegetal, manejo y edad de los sistemas.

Consideraciones sobre los arreglos temporales nogal–café

Las cinco experiencias analizadas muestran que la asociación de *J. neotropica* con café **no responde a un único modelo agroforestal**. Pimampiro, Yuyucocha y Natabuela representan arreglos temporales secuenciales; La Favorita corresponde a un establecimiento simultáneo; y Cananvalle reúne ambas modalidades. A esta diversidad temporal se añade una marcada variación en complejidad florística: desde la asociación relativamente simple de Pimampiro hasta los sistemas multiespecíficos y multiestratificados de Yuyucocha y Cananvalle.

La distinción entre **secuencial y simultáneo** debe entenderse como una característica del arreglo temporal y no como evidencia de que una modalidad sea intrínsecamente superior a la otra. Como plantea Somarriba (2012), los arreglos espacio-temporales forman parte de la organización de los componentes y resultan útiles para caracterizar y clasificar las formas de uso de la tierra agroforestales. En los casos estudiados, esta perspectiva permite interpretar cómo la secuencia de incorporación del nogal y el café condiciona la trayectoria estructural del sistema, sin atribuir a esa secuencia efectos productivos o ecológicos que todavía no hayan sido medidos.

En conjunto, estas experiencias muestran **dos trayectorias de conformación de sistemas agroforestales con *J. neotropica* y café en Ecuador**: una basada en la incorporación posterior del café a un componente arbóreo previamente establecido y otra fundamentada en el establecimiento conjunto de ambos componentes. Su seguimiento a largo plazo ofrece una oportunidad para evaluar cómo estas trayectorias influyen en el desarrollo del nogal, comportamiento del café, estructura del dosel, condiciones microclimáticas y funcionamiento del sistema agroforestal.

10.2.1.5. Asociación de nogal con cultivos anuales: el caso del maíz

La asociación de *J. neotropica* con maíz (*Zea mays*) constituye otra expresión de los sistemas agrosilvícolas registrados en los Andes ecuatorianos. A diferencia de las experiencias con café descritas anteriormente, en las que el componente agrícola es perenne, el maíz corresponde a un cultivo anual cuya presencia y cobertura dentro del sistema varían durante el ciclo agrícola. Observaciones de campo realizadas en las provincias de Chimborazo, Bolívar y Tungurahua muestran que esta asociación puede presentarse bajo diferentes configuraciones espaciales y condiciones de manejo, tanto en parcelas rurales de secano como en pequeñas áreas agrícolas bajo riego.

La Moya, Chimborazo: nogales dentro de la parcela de maíz

En La Moya, provincia de Chimborazo, se registraron individuos de *J. neotropica* establecidos dentro de una chacra cultivada con maíz. En esta configuración, el cultivo se distribuye alrededor de los árboles, de manera que ambos componentes ocupan simultáneamente la misma unidad productiva. El sistema se maneja bajo condiciones de secano y representa una forma de integración directa del componente arbóreo dentro del espacio destinado a la producción agrícola.

Al momento del registro fotográfico, realizado en agosto, el maíz se encontraba al final de su ciclo productivo y gran parte de la parcela había sido cosechada. La permanencia de los nogales contrasta así con el carácter temporal del cultivo anual: mientras el componente arbóreo mantiene una ocupación permanente del terreno, el componente agrícola cambia de acuerdo con el ciclo de cultivo y las labores realizadas en la chacra.

Las Palmas, Bolívar: disposición lineal de nogal en la cabecera de la parcela

En el sector Las Palmas, provincia de Bolívar, la asociación presenta una configuración espacial diferente. Los nogales, de aproximadamente 17 años al momento del registro, se encuentran dispuestos linealmente en la parte superior o cabecera de una parcela destinada al cultivo de maíz. La línea arbórea coincide espacialmente con una acequia de conducción de agua y se sitúa entre dos usos del terreno: pasto en la parte superior y cultivo agrícola en la parte inferior.

Esta disposición diferencia el caso de Bolívar del observado en La Moya. Mientras en este último los árboles se encuentran dentro del espacio cultivado y son rodeados por el maíz, en Las Palmas el componente arbóreo se concentra en una franja lineal asociada al límite entre usos de la parcela. Al momento de la observación, realizada también en agosto, el maíz había sido cosechado y los rastrojos permanecían visibles en el terreno. El cultivo se desarrolla bajo condiciones de secano.

Cevallos, Tungurahua: nogal en una pequeña parcela diversificada bajo riego

Una tercera configuración fue registrada en la cabecera cantonal de Cevallos, provincia de Tungurahua. En este caso, *J. neotropica* se encuentra integrado en una pequeña parcela agrícola donde coexiste con maíz y otros cultivos, entre ellos cebolla. A diferencia de los casos de La Moya y Las Palmas, la producción agrícola dispone de riego y se desarrolla dentro de un contexto urbano o periurbano.

La observación realizada durante la misma época del año muestra además una diferencia en el estado del cultivo: mientras en Chimborazo y Bolívar el maíz ya había sido cosechado, en Cevallos se encontraba todavía en una etapa temprana de desarrollo. Esta diferencia no debe interpretarse como una respuesta al nogal, sino como expresión de calendarios y condiciones locales de producción diferentes.

En conjunto, los tres casos muestran que la asociación entre *J. neotropica* y maíz no responde a una única configuración espacial. El nogal puede permanecer como componente arbóreo dentro de la chacra, disponerse linealmente en la cabecera o límite de la parcela, o integrarse en pequeñas unidades agrícolas diversificadas. Los registros comprenden además sistemas de secano en Chimborazo y Bolívar y un sistema bajo riego en Tungurahua. Estas experiencias evidencian la incorporación de *J. neotropica* en diferentes contextos de agricultura andina de pequeña escala, sin que las observaciones disponibles permitan atribuir ventajas productivas o ecológicas específicas a una configuración sobre otra. Las tres modalidades se ilustran en la Figura 10.9.

Figura 10.9

Asociación de Juglans neotropica con maíz en diferentes configuraciones agrosilvícolas de los Andes ecuatorianos

Nota. **(A)** Nogal establecido dentro de una chacra de maíz de secano en La Moya, provincia de Chimborazo. **(B)** Nogales de aproximadamente 17 años dispuestos linealmente en la cabecera de una parcela de maíz de secano en Las Palmas, provincia de Bolívar; la línea arbórea se encuentra asociada con una acequia de conducción de agua y separa áreas destinadas a pasto y cultivo agrícola. **(C)** Nogal integrado con maíz y otros cultivos en una pequeña parcela bajo riego en Cevallos, provincia de Tungurahua.

10.2.1.6. Arreglo multiestrato con dominancia arbórea de J. neotropica y cultivos agrícolas de ciclo diferenciado

En la comunidad de Natabuela, provincia de Imbabura, se desarrollan dos sistemas agroforestales secuenciales con dominancia arbórea de *J. neotropica*, establecidos hace aproximadamente **20 y 10 años**, respectivamente, bajo un marco inicial de plantación de **6 × 6 m**. A partir de esta estructura forestal se incorporaron progresivamente especies agrícolas y frutales de diferente porte y ciclo de producción, configurándose arreglos en los que la ocupación vertical del espacio cambia conforme avanza el desarrollo del nogal.

Una característica particularmente relevante de estos sistemas es, por tanto, su **dimensión temporal**. Durante las etapas iniciales, cuando los nogales presentan menor desarrollo de copa, existe mayor espacio disponible para incorporar componentes agrícolas de ciclo corto y medio. Conforme aumenta el tamaño del componente arbóreo, la composición de los estratos inferiores puede modificarse en función de las condiciones de luminosidad, espacio y manejo. De esta manera, la estructura observada actualmente es resultado tanto de la estratificación vertical como de la incorporación secuencial de especies durante el desarrollo del sistema.

Desde el punto de vista estructural, pueden reconocerse **cinco estratos verticales principales**, definidos de acuerdo con el porte y hábito de crecimiento de los componentes asociados:

1. **Estrato superior o arbóreo alto (>8 m).** Está representado principalmente por *J. neotropica*, que constituye el componente forestal dominante y define la estructura superior del sistema.
2. **Estrato arbóreo medio (5–8 m).** Comprende especies de menor porte que el nogal, entre ellas *Dovyalis abyssinica* (ciruelo chino), *Erythrina edulis* (porotón), *Inga insignis* (guaba) y *Psidium guajava* (guayaba). Estos componentes incrementan la diversidad de especies y productos del sistema; además, *Erythrina* e *Inga* corresponden a leguminosas asociadas con procesos de fijación biológica de nitrógeno.
3. **Estrato arbóreo bajo o subarbóreo (3–5 m).** Está integrado por *Ficus carica* (higo) y *Vasconcellea pubescens* (chamburo), especies frutales que ocupan posiciones intermedias entre el componente arbóreo y los estratos de menor altura.
4. **Estrato arbustivo y trepador (1–3 m).** Incluye *C. arabica*, *Passiflora ligularis*, *Rubus glaucus* y *Sechium edule*. La presencia de estos componentes amplía la diversidad productiva y permite aprovechar espacios situados bajo o entre las copas de los componentes arbóreos.
5. **Estrato herbáceo–rastrero (<1 m).** Comprende cultivos como *Cucurbita ficifolia* e *Ipomoea batatas* y pasto kikuyo *Cenchrus clandestinus*, que ocupan el nivel inferior del arreglo y proporcionan productos de ciclo relativamente corto. Por su hábito de crecimiento, estos componentes también contribuyen a mantener cobertura vegetal sobre parte de la superficie del suelo.

La coexistencia de estos cinco estratos configura una estructura vertical compleja, en la que especies de diferente arquitectura, porte y permanencia ocupan distintos niveles del sistema, como se ilustra en la Figura 10.10. Esta diferenciación permite utilizar una

misma superficie para combinar productos forestales, frutales y agrícolas y, al mismo tiempo, evidencia que la composición del arreglo puede modificarse durante el desarrollo de *J. neotropica*. En consecuencia, el sistema de Natabuela debe interpretarse no como una asociación estática de especies, sino como un arreglo agroforestal multiestrato y secuencial, cuya estructura responde al crecimiento del componente arbóreo y al manejo de los cultivos asociados.

Desde una perspectiva funcional, la estratificación puede favorecer una ocupación diferenciada del espacio aéreo y del suelo; sin embargo, también pueden presentarse interacciones competitivas por radiación, agua y nutrientes. Debido a que estos procesos no han sido cuantificados específicamente en los sistemas descritos, resulta más apropiado interpretar la configuración de Natabuela como una experiencia de **diversificación espacial y temporal de la producción**, sin atribuirle incrementos de productividad o eficiencia en el uso de recursos que no hayan sido medidos.

Figura 10.10

Arreglo agroforestal multiestrato con dominancia arbórea de Juglans neotropica en Natabuela, Imbabura, Ecuador

Nota. El arreglo presenta cinco estratos verticales, con *J. neotropica* como componente dominante del estrato arbóreo superior y especies arbóreas de menor porte, frutales, arbustivas, agrícolas y rastreras distribuidas en los niveles inferiores. La configuración corresponde a un sistema secuencial, en el que los componentes asociados se han incorporado progresivamente durante el desarrollo del nogal.

10.2.1.7. Plantaciones lineales multipropósito

Las plantaciones lineales multipropósito corresponden a arreglos en los que el componente arbóreo se dispone en líneas y desempeña simultáneamente más de una función dentro de la unidad productiva. De acuerdo con su ubicación y estructura, una misma formación arbórea puede actuar como lindero, cerca viva y barrera frente al viento, al tiempo que mantiene una relación espacial con los usos agrícolas o pecuarios de las áreas adyacentes.

En la comunidad rural Guananguicho Sur, cantón San Pedro de Huaca, provincia del Carchi, se encuentra una plantación lineal de *J. neotropica* constituida por individuos de aproximadamente **70 años de edad**. El arreglo forma parte de un paisaje agropecuario en el que las superficies adyacentes se destinan, entre otros usos, al cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) y de pasturas.

La disposición y permanencia de los nogales permiten que una misma estructura lineal cumpla simultáneamente funciones de **lindero, cerca viva y cortina rompevientos**. Estas funciones no representan tres sistemas independientes, sino atributos concurrentes de una misma práctica agroforestal determinados por su localización, continuidad y relación con los usos del suelo adyacentes. Esta configuración multipropósito se observa en la plantación lineal de Guananguicho Sur presentada en la Figura 10.11.

La edad aproximada de los individuos constituye una característica relevante del arreglo, debido a que evidencia la coexistencia temporal de un componente forestal de larga permanencia con usos agropecuarios que pueden modificarse sucesivamente en las parcelas contiguas. Mientras los nogales permanecen como estructura leñosa del paisaje, los componentes agrícolas o pecuarios pueden variar de acuerdo con las decisiones de manejo.

Desde el punto de vista estructural, los individuos adultos de *J. neotropica* conforman un estrato arbóreo lineal sobre el límite de las parcelas. Su configuración permite reconocer una función como barrera vegetal frente al viento; sin embargo, al no disponerse de mediciones de velocidad realizadas a barlovento y sotavento, no es posible cuantificar la magnitud de este efecto. De igual manera, la coexistencia del nogal con cultivos y pasturas documenta su integración espacial en el paisaje productivo, pero no permite atribuir cambios en la productividad agrícola o pecuaria sin mediciones específicas.

Figura 10.11

Plantación lineal multipropósito de Juglans neotropica en Guananguicho Sur, Carchi, Ecuador

Nota. Individuos de *J. neotropica* de aproximadamente 70 años de edad dispuestos linealmente en el límite de parcelas agropecuarias. El arreglo cumple simultáneamente funciones de lindero, cerca viva y cortina rompevientos y se encuentra asociado espacialmente con áreas destinadas a cultivos y pasturas. Comunidad Guananguicho Sur, cantón San Pedro de Huaca, provincia del Carchi, Ecuador.

10.2.2. Sistemas silvopastoriles con *J. neotropica*

Los sistemas silvopastoriles integran deliberadamente árboles o arbustos con pasturas y, cuando corresponde, animales dentro de una misma unidad de manejo. En estos arreglos, el componente forestal modifica la estructura vertical del sistema y puede generar condiciones diferenciadas de sombra, luminosidad y microclima, mientras que las pasturas y la actividad pecuaria determinan una parte importante de la dinámica de la cobertura vegetal y del suelo. Por esta razón, las interacciones resultantes dependen de la densidad y distribución de los árboles, composición de la pastura, intensidad de pastoreo y características ambientales del sitio.

En la provincia de Imbabura, Rivera (2026) evaluó el comportamiento ecológico de *J. neotropica* en cuatro prácticas agroforestales —agrosilvícola, silvopastoril, árboles

dispersos y cortina rompevientos— mediante variables edáficas, microclimáticas y de diversidad de flora y fauna. La práctica silvopastoril estudiada ocupa una superficie aproximada de **40 560,98 m² (4,06 ha)** y se localiza en la parroquia El Sagrario, cantón Cotacachi, a **2 396 m s. n. m.**

La incorporación de *J. neotropica* dentro de este arreglo genera una estructura en la que los individuos arbóreos coexisten con una cobertura predominantemente herbácea. Rivera (2026) registró **2 827 individuos vegetales** asociados al sistema, distribuidos entre árboles, arbustos, hierbas y regeneración natural. Un resultado particularmente relevante fue la presencia de **regeneración natural de *J. neotropica*, equivalente al 1,13 % de los individuos registrados**, proporción superior a la observada por el autor en las prácticas de árboles dispersos y cortina rompevientos evaluadas en el mismo estudio.

Este resultado merece atención desde la perspectiva del manejo. La coexistencia de individuos adultos con regeneración natural indica que el sistema silvopastoril evaluado mantiene condiciones que permiten, al menos parcialmente, el establecimiento de nuevos individuos de nogal. Sin embargo, el registro de regeneración no demuestra por sí mismo que el pastoreo favorezca este proceso, debido a que su establecimiento puede estar condicionado simultáneamente por disponibilidad de semillas, cobertura herbácea, intensidad de pastoreo, microambientes de germinación y manejo del sitio. En consecuencia, la regeneración observada debe interpretarse como una característica del sistema estudiado y no como un efecto causal atribuido a la actividad ganadera.

Las condiciones de luminosidad mostraron una marcada variación temporal. Durante septiembre, correspondiente al período de mayor cobertura foliar considerado en la investigación, el sistema silvopastoril de Cotacachi presentó **33,28 % de luminosidad**, el valor más bajo entre las cuatro prácticas evaluadas. En enero, durante la etapa de menor cobertura foliar, la luminosidad aumentó hasta **74,88 %**, que fue el valor más alto registrado entre los cuatro sistemas para ese período. La diferencia entre ambas mediciones alcanzó **41,60 puntos porcentuales**.

Esta variación evidencia que las condiciones lumínicas bajo *J. neotropica* no son constantes durante el año. La dinámica foliar del nogal y la estructura de los demás componentes vegetales modifican estacionalmente la cantidad de radiación que alcanza los estratos inferiores. Para un sistema silvopastoril, esta característica resulta particularmente relevante porque la disponibilidad de luz constituye uno de los factores que condicionan el crecimiento de las especies herbáceas situadas bajo el dosel. No obstante, Rivera (2026) no evaluó directamente la productividad de la pastura en respuesta a estos cambios, por lo que no corresponde establecer una relación cuantitativa entre los porcentajes de luminosidad registrados y la producción de forraje.

La temperatura también presentó diferencias entre las prácticas estudiadas. Durante el período de evaluación, los valores registrados en los cuatro sistemas se mantuvieron aproximadamente entre **15 y 20 °C**, y la práctica silvopastoril presentó las temperaturas más bajas y relativamente estables; en diciembre se registró un valor

próximo a **15 °C**. En cuanto a humedad relativa, el sistema mostró valores intermedios respecto de las demás prácticas y alcanzó aproximadamente **65 % en diciembre**. Estos resultados permiten caracterizar el microclima del sitio silvopastoril, aunque las diferencias entre prácticas deben interpretarse con cautela, debido a que los sistemas evaluados se encuentran en localidades diferentes y, por tanto, no representan tratamientos experimentales establecidos bajo condiciones ambientales idénticas.

Estos resultados son particularmente útiles para evitar una generalización frecuente en la literatura agroforestal: la presencia del componente arbóreo **no implicó un incremento generalizado de la fertilidad química del suelo**. En el sistema evaluado, algunos elementos presentaron valores superiores en el área asociada con los árboles y otros mostraron el patrón contrario. Rivera concluye, en consecuencia, que el comportamiento de los nutrientes depende de la dinámica del sistema, la competencia por recursos y el manejo.

La fauna asociada también presentó respuestas cuantificables. En el muestreo de insectos se registraron **270 individuos**, distribuidos principalmente entre Hymenoptera (**67,78 %**) y Diptera (**32,22 %**). El índice de Shannon-Wiener para este componente fue de **H′ = 1,00**, mientras que el índice de Simpson alcanzó **0,61**. Estos registros caracterizan la comunidad de insectos presente en el sistema, pero no permiten asumir que los Hymenoptera observados actúan específicamente como polinizadores de *J. neotropica*.

Para la avifauna se registraron **85 individuos**. Las especies con mayor representación fueron *Pheucticus chrysogaster* (**37,65 %**), *Zenaida auriculata* (**17,65 %**), *Sittasomus griseicapillus* (**14,12 %**) y *Sporophila luctuosa* (**10,59 %**). La diversidad alcanzó **H′ = 1,74** mediante Shannon-Wiener y **0,78** mediante Simpson. Estos valores muestran que el sistema es utilizado por diferentes especies de aves, aunque tampoco permiten atribuir su presencia exclusivamente al nogal, puesto que las aves responden a la estructura y oferta de recursos del agroecosistema completo.

En conjunto, el estudio de Rivera (2026) permite caracterizar el sistema silvopastoril con *J. neotropica* mediante indicadores medidos directamente y muestra que las interacciones no siguen una única dirección. El arreglo presentó una marcada variación estacional de luminosidad, regeneración natural de nogal, diferencias en las propiedades químicas del suelo y comunidades asociadas de insectos y aves. A la vez, los resultados evidencian que la presencia del componente arbóreo no produce necesariamente un aumento uniforme de nutrientes ni permite atribuir al nogal, de manera aislada, las condiciones microclimáticas o la diversidad biológica registrada. El comportamiento del sistema debe interpretarse como resultado de la interacción entre **árboles, cobertura herbácea, condiciones del sitio y manejo**.

Un antecedente sobre el potencial de *J. neotropica* para su incorporación en sistemas silvopastoriles fue planteado por Guamán Calderón & Ipiales Acosta (2011) en la microcuenca del río Blanco, en los cantones Mira y Espejo, norte del Ecuador. A partir de la caracterización del uso y la capacidad de uso de la tierra, los autores incluyeron al

nogal entre las especies recomendadas para sistemas silvopastoriles y plantaciones forestales. Este enfoque de planificación coincide con lo expuesto en el ámbito regional por Álvarez Valencia (2014) en Colombia, quien clasifica a la especie como un recurso vegetal promisorio de alto valor agroforestal y socioeconómico, destacando su aptitud para diversificar los ingresos rurales y proveer servicios ambientales en entornos productivos. Ambos antecedentes constituyen recomendaciones técnicas sobre el uso potencial de la especie y no la evaluación de un sistema silvopastoril establecido con nogal.

La regeneración natural observada en Cotacachi adquiere especial interés cuando se considera conjuntamente con otros registros realizados en el marco del Programa de Investigación *Juglans*. En Cuyuja, provincia de Napo, se han documentado individuos de *J. neotropica* originados mediante regeneración natural que son conservados por los agricultores dentro de áreas con cobertura herbácea posteriormente utilizadas para actividad silvopastoril. Este proceso muestra una trayectoria de incorporación del nogal diferente de aquella basada exclusivamente en el establecimiento mediante plantación: el sistema silvopastoril puede construirse también mediante la conservación y el manejo de individuos de nogal provenientes de regeneración natural, que progresivamente pasan a constituir el componente arbóreo del sistema (Figura 10.12).

Esta modalidad resulta particularmente relevante desde una perspectiva de manejo y conservación, porque vincula la regeneración natural de *J. neotropica* con su incorporación a sistemas productivos. En lugar de eliminar los individuos que se establecen espontáneamente durante el manejo del predio, estos pueden mantenerse como parte de la estructura arbórea asociada con la cobertura herbácea y la actividad pecuaria.

Las observaciones realizadas en Cuyuja forman parte de los estudios desarrollados en el marco del Programa de Investigación *Juglans* y de la investigación de Guevara & Yépez (2026). La situación registrada no demuestra que el pastoreo favorezca la regeneración del nogal, pero sí documenta una alternativa de conformación de sistemas silvopastoriles basada en el aprovechamiento de la regeneración natural existente.

Figura 10.12

Juglans neotropica proveniente de regeneración natural como componente de un sistema silvopastoril en Cuyuja, Napo, Ecuador

Nota. Individuos de *J. neotropica* originados mediante regeneración natural y conservados como componente arbóreo en un área con cobertura herbácea destinada a actividad silvopastoril. La presencia de animales y pastura evidencia la integración espacial de los componentes arbóreo, herbáceo y pecuario. Registro realizado en Cuyuja, Napo, en el marco del Programa de Investigación *Juglans* y de los estudios de Guevara & Yépez (2026).

Los linderos, además de presentarse en sistemas agrosilvícolas como los descritos en el apartado 10.2.1.1, pueden formar parte de sistemas silvopastoriles cuando el componente arbóreo se integra espacialmente con pasturas y producción pecuaria. Esta configuración fue registrada en Salcedo, provincia de Cotopaxi, donde individuos adultos de *J. neotropica* se encuentran dispuestos linealmente junto a una pastura de kikuyo utilizada por ganado bovino (Figura 10.13).

Figura 10.13

Lindero de Juglans neotropica en un sistema silvopastoril de Salcedo, Cotopaxi, Ecuador

Nota. Individuos adultos de *J. neotropica* establecidos en disposición lineal junto a una pastura de kikuyo (*Cenchrus clandestinus*, sin. *Pennisetum clandestinum*) utilizada para alimentación de ganado bovino.

10.2.3. Sistemas agroforestales multiestrato: estudio de caso en Yuyucocha

Los sistemas agroforestales multiestrato se caracterizan por la coexistencia de componentes vegetales con diferentes hábitos de crecimiento, alturas y funciones, cuya disposición vertical genera una estructura semejante, en términos funcionales, a la estratificación de comunidades vegetales complejas. En estos sistemas, las especies forestales pueden compartir el espacio con cultivos agrícolas, frutales, plantas de uso alimenticio, medicinal, ornamental o forrajero, además de proporcionar hábitat y recursos para diferentes grupos de fauna y otros organismos.

Un ejemplo de esta modalidad se encuentra en el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, en Ibarra, donde durante varias décadas se ha conformado progresivamente un sistema agroforestal caracterizado por una elevada diversidad de especies y una marcada diferenciación vertical. A diferencia de una plantación diseñada en un único momento, su estructura actual es resultado de la incorporación y permanencia de especies establecidas con diferentes propósitos productivos, académicos y

experimentales. Los registros realizados en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) permiten interpretar este espacio como un **sistema agroforestal multiestrato de carácter multipropósito**, en el cual *J. neotropica* forma parte de una matriz vegetal diversa.

La estructura vertical comprende un **dosel superior**, integrado principalmente por especies forestales de mayor porte como *Cupressus macrocarpa*, *Pinus patula*, *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Casuarina equisetifolia*. Por debajo de este se desarrolla un **estrato arbóreo medio considerablemente más diverso**, en el que se encuentran *J. neotropica*, *Inga insignis*, *Alnus acuminata*, *Cedrela odorata*, *Acacia melanoxylon*, *Vachellia macracantha*, *Fraxinus excelsior*, *Jacaranda mimosifolia*, *Tecoma stans*, *Sambucus nigra*, *Leucaena leucocephala* y *Morus alba*, entre otras especies. A ellas se incorporan frutales como *Persea americana*, *Psidium guajava*, *Psidium cattleyanum*, *Citrus limon*, *Eriobotrya japonica* y *Pouteria lucuma*. En estratos inferiores se desarrolla *C. arabica*, representado en el sistema por los materiales SL28, Bourbon Sidra y Caturra Roja, junto con otras plantas cultivadas y vegetación herbácea.

La composición del sistema refleja una marcada diversidad estructural y funcional. En una misma superficie coexisten especies forestales de dosel superior e intermedio, frutales, especies fijadoras de nitrógeno y de aporte de materia orgánica, café y otros componentes del sotobosque, a los que se suma una diversidad fúngica asociada al suelo y a determinadas especies arbóreas. Esta composición integra funciones productivas y ecológicas relacionadas con la producción de madera, frutos y café, el aporte de materia orgánica, la provisión de forraje y recursos para la fauna, entre otras. Los principales componentes y grupos funcionales registrados en el sistema se sintetizan en la Tabla 10.1.

Tabla 10.1
Principales componentes y grupos funcionales del sistema agroforestal multiestrato de Yuyucocha

Componente o grupo funcional	Especies representativas	Estrato predominante	Funciones registradas en el sistema
Forestales del dosel superior	*Cupressus macrocarpa*, *Pinus patula*, *Eucalyptus globulus*, *Casuarina equisetifolia*, *Pinus radiata*	Superior	Producción de madera, conformación del dosel superior y generación de cobertura.
Nogal andino	*Juglans neotropica*	Medio–superior	Madera, frutos, componente estructural del sistema y soporte utilizado por fauna silvestre.
Especies fijadoras de N y/o de aporte orgánico	*Inga insignis*, *Alnus acuminata*, *Leucaena leucocephala*, *Erythrina edulis*, *Vachellia macracantha*, *Calliandra pittieri*	Medio	Fijación biológica de N en las especies correspondientes, aporte de materia orgánica, sombra y, en *L. leucocephala*, uso forrajero.

Tabla 10.1 (continuación)

Principales componentes y grupos funcionales del sistema agroforestal multiestrato de Yuyucocha

Componente o grupo funcional	Especies representativas	Estrato predominante	Funciones registradas en el sistema
Frutales	*Psidium guajava*, *Persea americana*, *Eriobotrya japonica*, *Psidium cattleyanum*, *Pouteria lucuma*, *Citrus limon*	Medio	Producción de frutos para consumo humano y/o fauna silvestre; provisión de recursos alimenticios y hábitat.
Morera	*Morus alba*	Medio	Remanente del proyecto de sericultura desarrollado anteriormente en Yuyucocha; sus hojas fueron utilizadas como alimento de *Bombyx mori.*
Café	*Coffea arabica*: SL28, Bourbon Sidra y Caturra Rojo	Inferior–medio	Componente agrícola productivo establecido bajo cobertura arbórea; producción de café.
Otras especies leñosas	*Acacia melanoxylon*, *Fraxinus excelsior*, *Cedrela montana*, *Jacaranda mimosifolia*	Medio–superior	Producción de madera, funciones ornamentales y contribución a la diversidad y complejidad estructural.
Otros componentes del estrato medio e inferior	*Tecoma stans*, *Sambucus nigra*, *Hibiscus* sp., *Canna* sp.	Medio–inferior y sotobosque	Funciones ornamentales, medicinales, alimenticias y melíferas, y provisión de recursos para fauna.
Hongos asociados	*Suillus luteus Laccaria fraterna, Lycoperdón sp.,Pholiota sp.,Sropharia sp.*	Suelo	Diversidad fúngica; asociación ectomicorrícica de *S. luteus* con *Pinus* spp. y presencia de hongos con potencial alimenticio.

Nota. Los componentes se agrupan según su posición predominante y las principales funciones registradas en el sistema agroforestal multiestrato del campus Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador. La asignación de estratos corresponde a la posición observada dentro del sistema y no necesariamente a la altura potencial máxima de cada especie.

Dentro de esta estructura, *J. neotropica* adquiere particular relevancia por su integración en los estratos medio y superior y por su coexistencia con otros componentes productivos y ecológicos. En Yuyucocha se encuentran individuos de nogal de diferentes edades asociados con *C. arabica*, representado por las variedades SL28, Bourbon Sidra y Caturra Rojo. En esta configuración, el café ocupa predominantemente los estratos inferiores bajo una cobertura arbórea multiespecífica, de la cual *J. neotropica* forma parte (Figura 10.14).

Figura 10.14

Integración de Juglans neotropica y Coffea arabica en el sistema agroforestal multiestrato de Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador

Nota. Individuos jóvenes de *J. neotropica* asociados con *C. arabica* dentro del sistema agroforestal multiestrato del campus Yuyucocha, Universidad Técnica del Norte. El café incluye las variedades SL28, Bourbon Sidra y Caturra Rojo.

Otro componente de interés dentro del sistema es *Morus alba*, cuyos individuos constituyen remanentes de un proyecto de sericultura desarrollado anteriormente en Yuyucocha. La presencia de esta especie conserva, por tanto, un testimonio biológico de un uso productivo previo del sitio, debido a que sus hojas fueron empleadas como alimento del gusano de seda (*Bombyx mori*). Actualmente, la morera permanece integrada al estrato medio del sistema, en asociación espacial con el café y otros componentes arbóreos, como evidencia de distintas etapas históricas de manejo y uso productivo del predio (Figura 10.15).

Figura 10.15

Morus alba asociada con Juglans neotropica en el sistema agroforestal multiestrato de Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador

Nota. **A)** *Morus alba* asociada espacialmente con *J. neotropica* en el sistema agroforestal multiestrato de Yuyucocha. **B)** Detalle de las hojas de *M. alba*. Los individuos corresponden a remanentes de un proyecto de sericultura desarrollado anteriormente en Yuyucocha, en el cual las hojas de morera se utilizaron como alimento de *Bombyx mori*.

La diversidad funcional del sistema se extiende también hacia la fauna silvestre. Durante las observaciones realizadas en Yuyucocha se ha registrado la presencia de aves, insectos y pequeños mamíferos que utilizan diferentes componentes vegetales como fuentes de alimento, refugio y sitios de descanso. Frutos producidos por especies como *Psidium guajava*, *Inga insignis* y *Sambucus nigra* constituyen recursos alimenticios disponibles, mientras que la coexistencia de diferentes estratos, densidades de copa y formas de crecimiento genera una estructura vegetal heterogénea que ofrece distintos espacios para la fauna.

Entre los registros de campo destacan dos evidencias directas del uso de los componentes leñosos por aves: un nido de colibrí (*Colibri* sp.) establecido en un árbol de lúcuma (*Pouteria lucuma*), especie frutal cultivada en Yuyucocha, y la presencia del pájaro brujo o mosquero cardenal (*Pyrocephalus rubinus*) utilizando individuos de *J. neotropica* como sitios de percha (Figura 10.16). El primer registro documenta el uso de un frutal del sistema como sitio de reproducción, mientras que el segundo evidencia la utilización directa del nogal andino por la avifauna. En conjunto, estas observaciones muestran que los componentes arbóreos, además de sus funciones productivas, forman parte del hábitat utilizado por la fauna silvestre.

Figura 10.16

Uso de componentes leñosos del sistema agroforestal de Yuyucocha por avifauna silvestre

Nota. **A)** Nido de colibrí (*Colibri* sp.) establecido en una rama de lúcuma (*Pouteria lucuma*); el follaje circundante fue eliminado digitalmente para destacar el nido. **B)** Pájaro brujo o mosquero cardenal (*Pyrocephalus rubinus*) perchado en un árbol de nogal (*J. neotropica*). Ambos registros proceden del sistema agroforestal multiestrato del campus Yuyucocha y documentan el uso de sus componentes leñosos como sitios de nidificación y percha por la avifauna silvestre. Campus Yuyucocha, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Imbabura, Ecuador.

La función de hábitat también involucra directamente al nogal. Los registros fotográficos realizados durante el seguimiento de fauna en Yuyucocha documentan aves posadas sobre individuos inequívocamente identificados en campo como *J. neotropica*. Esta observación resulta relevante porque permite pasar de una inferencia general sobre el potencial de los árboles como hábitat a una evidencia directa de utilización de la especie por la avifauna presente en el sistema.

La diversidad biológica del sistema comprende igualmente el **componente fúngico**. Las colectas realizadas permitieron reconocer cuatro taxones de macromicetos mediante identificación taxonómica especializada: *Lycoperdon* sp., del grupo *bovista*; *Pholiota* sp.; *Laccaria fraterna* (Sacc.) Pegler; y *Stropharia* sp. El informe señala que *L. fraterna* pudo determinarse a nivel de especie, mientras que para algunos de los restantes

especímenes se recomienda complementar la identificación morfológica mediante nuevas colectas y análisis moleculares.

A estos registros se suma *Suillus luteus*, previamente reconocido en Yuyucocha y asociado a especies del género *Pinus*. En conjunto, los registros disponibles permiten reconocer **al menos cinco taxones de macromicetos** en el sistema. Este componente adquiere especial interés por la presencia de abundante materia orgánica superficial y por la coexistencia de especies arbóreas de diferente origen y características funcionales. No obstante, las identificaciones deben conservar el nivel taxonómico alcanzado en laboratorio y evitar asignaciones específicas cuando las características de las muestras no lo permiten; el propio informe advierte que los especímenes colectados en estado juvenil pueden dificultar la determinación a nivel de especie.

La coexistencia de especies forestales, frutales, café, plantas forrajeras, vegetación del sotobosque, hongos y fauna silvestre convierte así a Yuyucocha en un caso demostrativo de **agroforestería multiestrato y multipropósito**. El interés del sistema no reside únicamente en el número de especies presentes, sino en las interacciones que se establecen entre sus componentes: producción de alimentos y madera, generación de sombra, aporte de materia orgánica, fijación biológica de nitrógeno, provisión de recursos florales y frutos, formación de hábitat y mantenimiento de organismos asociados al suelo.

Desde la perspectiva específica de *J. neotropica*, el caso de Yuyucocha demuestra que la especie puede integrarse en arreglos agroforestales estructuralmente complejos sin limitarse a desempeñar una función exclusivamente maderable. Su presencia en el estrato arbóreo, combinada con cultivos como el café, frutales, especies forestales y organismos asociados, permite concebir al nogal como un **componente multipropósito de sistemas agroforestales andinos diversificados**. Esta experiencia complementa los sistemas analizados anteriormente en el capítulo y muestra una alternativa en la cual la producción, la conservación de biodiversidad y las funciones ecológicas pueden coexistir dentro de una misma unidad de manejo.

10.2.4. Huertos tradicionales urbanos: caso de Cuenca

Los huertos tradicionales urbanos constituyen una modalidad particular de sistema agroforestal en la que especies arbóreas, frutales, medicinales, ornamentales y hortícolas coexisten en espacios asociados a las viviendas. A diferencia de arreglos agroforestales establecidos mediante diseños técnicos previamente definidos, estos sistemas pueden ser el resultado de procesos históricos de selección, permanencia y manejo de especies desarrollados por varias generaciones. En este contexto, los huertos conservados en edificaciones patrimoniales de Cuenca constituyen un ejemplo relevante para comprender la presencia de *J. neotropica* dentro de espacios agroforestales urbanos tradicionales.

Contento Minga (2012), en una investigación desarrollada por el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC), estudió los huertos asociados a edificaciones patrimoniales de dos contextos del Azuay: el centro histórico de Cuenca, como espacio urbano, y San Bartolomé, como espacio rural. La investigación adoptó una perspectiva etnobotánica y de patrimonio cultural inmaterial, orientada a documentar los usos, memorias y saberes relacionados con estos espacios. Para el caso de Cuenca se

identificaron edificaciones que conservaban huertos y se seleccionaron diez casas patrimoniales para el estudio; la información botánica fue analizada conjuntamente con los conocimientos y experiencias de sus propietarios y cuidadores.

La permanencia de estos espacios tiene antecedentes históricos relacionados con la propia configuración de las viviendas urbanas. Los predios tradicionales disponían de áreas suficientemente amplias para integrar la residencia con patios, jardines, huertos y espacios destinados a animales menores. En las casas antiguas, las habitaciones podían distribuirse alrededor de dos o más patios, mientras que las áreas posteriores se destinaban al cultivo y, en determinados casos, a la crianza de animales. Sin embargo, el crecimiento urbano y las transformaciones en los usos de las edificaciones han reducido progresivamente estos espacios, que en diferentes casos fueron sustituidos por construcciones, parqueaderos, restaurantes y otras actividades urbanas.

Desde el punto de vista de su composición vegetal, estos huertos presentan una estructura diversificada. Contento Minga (2012) identificó cuatro grandes grupos de plantas —hortalizas, frutales, medicinales y ornamentales— con diferentes ciclos de cultivo. Entre las especies frutales perennes registradas se encuentra expresamente el **nogal**, junto con pera, manzana, durazno, babaco, tomate de árbol, chirimoya, aguacate, guaba, higo y otras especies. Esta coexistencia de componentes vegetales con diferentes formas de crecimiento y permanencia permite reconocer en estos huertos una estructura compatible con los principios de diversificación espacial y temporal propios de los sistemas agroforestales.

Particularmente interesante resulta la organización espacial de las especies arbóreas. El estudio señala que los árboles de mayor tamaño y capaces de producir sombra significativa se localizan preferentemente hacia los márgenes del terreno, con el propósito de reducir la ocupación y sombreado del espacio cultivable. Dentro de este grupo se menciona al **nogal**, junto con chirimoya, guaba, aguacate, capulí, magnolia, higo y coco. En las proximidades de estos árboles se ubican especies ornamentales con menores requerimientos de luminosidad. En contraste, especies arbóreas de menor tamaño y sombra menos intensa pueden disponerse de manera alternada o igualmente hacia los bordes, permitiendo el cultivo cercano de plantas medicinales, hortalizas y forraje.

Esta disposición constituye un aspecto particularmente relevante desde la perspectiva agroforestal. La ubicación de los árboles no parece responder únicamente a una función ornamental, sino también a una **organización empírica del espacio y de la radiación disponible**. Contento Minga (2012) concluye que la distribución de las plantas dentro de los huertos está relacionada con sus necesidades de luz, espacio y rotación de cultivos. En consecuencia, la presencia del nogal puede interpretarse como parte del estrato arbóreo superior cuya copa condiciona la distribución de otros componentes vegetales, generando una diferenciación vertical y horizontal característica de los sistemas agroforestales complejos.

El caso de Cuenca adquiere una dimensión adicional porque los árboles presentes en estos huertos no representan exclusivamente componentes productivos contemporáneos. El estudio señala que en los huertos urbanos se encuentran árboles grandes —entre ellos el nogal— combinados principalmente con plantas ornamentales y algunas medicinales, y que **muchos de estos individuos fueron establecidos por**

generaciones anteriores. Su conservación responde tanto a su valor productivo y decorativo como al significado afectivo que mantienen para quienes habitan las edificaciones. De esta manera, el árbol adquiere simultáneamente funciones biológicas, productivas, espaciales y culturales.

Esta característica diferencia a los huertos tradicionales de otros sistemas agroforestales analizados en este capítulo. Mientras en una plantación agroforestal moderna la incorporación de *J. neotropica* puede responder a decisiones explícitas de diseño, densidad y producción, en los huertos patrimoniales su presencia constituye también el resultado de una **continuidad intergeneracional del manejo del espacio doméstico**. El nogal puede permanecer no solamente por los productos que genera, sino porque forma parte de la estructura y de la memoria del huerto.

La dimensión cultural de esta presencia aparece de manera explícita en los testimonios recopilados por Contento Minga (2012). Entre las creencias registradas en Cuenca y San Bartolomé se señala que los árboles de nogal y aguacate no debían establecerse cerca de las viviendas debido a relatos tradicionales asociados con árboles envejecidos o que habían dejado de producir. Este registro debe entenderse como **memoria oral y conocimiento cultural documentado**, y no como una característica biológica de la especie. Su importancia radica en mostrar que las decisiones sobre localización, conservación o reemplazo de determinados árboles también podían estar mediadas por representaciones culturales transmitidas entre generaciones.

La continuidad de estos sistemas se encuentra, sin embargo, amenazada. En Cuenca, los huertos han perdido progresivamente superficie frente a nuevos usos de las edificaciones patrimoniales y, aunque algunos permanecen por razones estéticas y afectivas, existe una reducción del interés de las nuevas generaciones por su mantenimiento. El estudio advierte que esta transformación puede conducir no solamente a la desaparición física de los huertos, sino también a la pérdida de conocimientos relacionados con el manejo, propagación y reproducción de las especies que los integran.

Desde esta perspectiva, los huertos tradicionales de Cuenca permiten ampliar la comprensión de los sistemas agroforestales con *J. neotropica*. El nogal no aparece únicamente como un árbol frutal aislado dentro de una vivienda, sino como componente arbóreo de un sistema vegetal diverso, espacialmente organizado y construido mediante procesos de manejo acumulados durante generaciones. Su presencia junto con frutales, plantas medicinales, ornamentales y, en determinados huertos, hortalizas, evidencia una forma histórica de integración entre árboles y producción doméstica en ambientes urbanos andinos.

En consecuencia, la conservación de estos huertos puede contribuir simultáneamente al mantenimiento de agrobiodiversidad urbana, árboles maduros de *J. neotropica* y conocimientos tradicionales asociados a su manejo. El caso de Cuenca muestra así que la agroforestería con nogal no se restringe a sistemas productivos rurales contemporáneos, sino que posee también una expresión histórica y cultural dentro del paisaje urbano andino, donde la permanencia de árboles establecidos por generaciones anteriores constituye un vínculo entre producción, patrimonio biocultural y memoria del territorio.

10.2.5. Bosquetes de *J. neotropica* en áreas de producción agropecuaria

Los bosquetes constituyen una práctica agroforestal caracterizada por el establecimiento o mantenimiento de árboles agrupados en una superficie reducida dentro de una propiedad agropecuaria, diferenciándose espacialmente de otras configuraciones como árboles dispersos, linderos o plantaciones lineales. Esta práctica ha sido documentada históricamente en la Sierra ecuatoriana. Carlson & Añazco (1990) incluyeron los "pequeños bosquetes en la propiedad agrícola" entre los tipos de plantaciones agroforestales promovidos en la región, particularmente en propiedades de pequeños productores.

Los bosquetes pueden cumplir funciones productivas y ambientales dentro de la propiedad. Entre las funciones señaladas para esta práctica se encuentran la producción de madera y leña, así como contribuciones a la recuperación del suelo mediante el desarrollo radicular, el aporte de materia orgánica y el mejoramiento de la infiltración. También se ha señalado su potencial para reducir el efecto de las heladas sobre cultivos aledaños (Carlson & Añazco, 1990).

Durante los recorridos de campo del Programa de Investigación *Juglans* se registró en Guayllabamba, provincia de Pichincha, un bosquete constituido por individuos adultos de *J. neotropica* dentro de una propiedad agropecuaria. Los árboles conforman un agrupamiento claramente diferenciado de los usos productivos circundantes; en el área adyacente se encuentra, entre otros usos, un cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) destinado a la producción de forraje (Figura 10.17). Este registro documenta la presencia actual del nogal andino en una configuración agroforestal de bosquete en la Sierra ecuatoriana.

Figura 10.17

Bosquete de Juglans neotropica en una propiedad agropecuaria de Guayllabamba, Pichincha, Ecuador

Nota. Agrupamiento de individuos adultos de *J. neotropica* en una superficie reducida dentro de una propiedad agropecuaria; al fondo se observa un área cultivada con alfalfa (*Medicago sativa*) destinada a la producción de forraje.

10.3. Interacciones ecológicas y funcionales en sistemas agroforestales con *J. neotropica*

El funcionamiento de un sistema agroforestal depende no solamente de las especies que lo integran, sino de las interacciones que se establecen entre sus componentes arbóreos, agrícolas, pecuarios, edáficos y biológicos. Estas relaciones pueden expresarse mediante complementariedad en el uso de recursos, modificación del microclima, aporte y redistribución de materia orgánica, provisión de hábitat para la fauna y competencia por luz, agua y nutrientes. En los sistemas que incorporan *J. neotropica*, estas interacciones adquieren especial importancia debido al tamaño que puede alcanzar la especie, su condición caducifolia y los cambios que experimenta su copa durante el año.

Una de las interacciones más evidentes corresponde a la modificación del ambiente lumínico. La copa del nogal intercepta parte de la radiación incidente y genera condiciones diferenciadas entre el espacio situado bajo su influencia y las áreas abiertas.

Sin embargo, esta relación no permanece constante durante el año. Los resultados presentados previamente para el sistema silvopastoril estudiado por Rivera (2026) muestran una marcada variación de la luminosidad entre períodos de mayor y menor cobertura foliar. Esta dinámica indica que la influencia del nogal sobre los estratos inferiores debe interpretarse temporalmente y no como una condición uniforme de sombra.

Esta característica puede resultar relevante para el diseño agroforestal. Durante los períodos de mayor cobertura foliar, el dosel puede disminuir la radiación que alcanza los cultivos o pasturas, mientras que la reducción estacional del follaje incrementa nuevamente la entrada de luz. Por consiguiente, la compatibilidad entre *J. neotropica* y los componentes asociados dependerá, entre otros factores, de los requerimientos lumínicos de estos últimos, de la densidad de árboles, de su distribución espacial y del manejo de las copas. La presencia del nogal no debe interpretarse automáticamente como favorable o desfavorable: el resultado depende de la intensidad, duración y distribución espacial de la interacción.

Los huertos tradicionales de Cuenca aportan una evidencia complementaria sobre este proceso. Como se analizó en el apartado anterior, los árboles capaces de generar sombra significativa —entre ellos el nogal— se disponían preferentemente hacia los márgenes de los huertos, mientras que la localización de otros componentes vegetales respondía a sus requerimientos de luminosidad y espacio. Esta organización constituye un ejemplo de cómo el conocimiento acumulado por los agricultores puede traducirse en decisiones espaciales destinadas a regular las interacciones entre los diferentes estratos del sistema.

Otro componente funcional corresponde a las interacciones suelo–árbol–cultivo. La presencia de árboles modifica la distribución de hojarasca, materia orgánica, raíces y humedad del suelo, pero estos procesos no necesariamente producen incrementos uniformes en la fertilidad. Como mostró el estudio de Rivera (2026), algunos elementos químicos pueden presentar mayores concentraciones en áreas asociadas con los árboles y otros mostrar tendencias diferentes. Por ello, resulta más apropiado considerar al nogal como un componente que participa en la dinámica de nutrientes del sistema que atribuirle, sin evidencia experimental específica, un efecto general de mejoramiento de la fertilidad.

En sistemas más diversos, esta dinámica se amplía mediante las funciones desempeñadas por las especies acompañantes. El sistema multiestrato de Yuyucocha constituye un ejemplo particularmente ilustrativo: junto con *J. neotropica* se encuentran especies como *Inga insignis* y *Alnus acuminata*, capaces de incorporar nitrógeno al sistema mediante fijación biológica, además de numerosos componentes que aportan hojarasca y residuos orgánicos. De esta manera, el funcionamiento edáfico resulta de la interacción del conjunto de especies y no exclusivamente del nogal. La diversidad funcional permite que diferentes componentes participen de manera complementaria en los ciclos de nutrientes y materia orgánica.

Las relaciones subterráneas incorporan otra dimensión de complejidad. Las raíces de árboles, cultivos y especies herbáceas exploran diferentes volúmenes del suelo y pueden establecer relaciones tanto complementarias como competitivas. A ello se suma la actividad de hongos y otros organismos edáficos. Los registros efectuados en

Yuyucocha, incluida la presencia de hongos asociados a los componentes arbóreos del sistema, evidencian que la diversidad agroforestal se extiende por debajo del suelo. No obstante, mientras no se disponga de estudios específicos sobre las asociaciones micorrícicas de *J. neotropica* en este sitio, no corresponde atribuir al nogal relaciones simbióticas particulares a partir de la sola presencia de los hongos registrados.

Las interacciones con la fauna silvestre constituyen igualmente una función relevante. La diversidad de estratos, copas, frutos, flores y espacios de refugio incrementa la heterogeneidad estructural de los sistemas agroforestales y proporciona recursos utilizados por diferentes organismos. Las observaciones efectuadas en Yuyucocha muestran directamente esta relación: se ha registrado nidificación de *Colibri* sp. en *Pouteria lucuma* y utilización de individuos de *J. neotropica* como sitios de percha por *Pyrocephalus rubinus*. Estos registros no permiten atribuir la presencia de las aves exclusivamente al nogal, pero documentan que los componentes leñosos forman parte del hábitat utilizado por la fauna dentro del sistema agroforestal.

Una interacción particularmente importante para la permanencia del nogal es la que se establece entre regeneración natural y manejo agropecuario. Los registros presentados para los sistemas silvopastoriles muestran que *J. neotropica* puede incorporarse a estos arreglos no solamente mediante plantación, sino también mediante la conservación deliberada de individuos procedentes de regeneración natural. Esta posibilidad ha sido observada en Cuyuja, provincia de Napo, dentro de las investigaciones vinculadas al Programa *Juglans*, donde agricultores mantienen individuos de nogal surgidos naturalmente en áreas con cobertura herbácea posteriormente utilizadas por animales.

Desde una perspectiva de manejo, este proceso resulta especialmente significativo porque plantea una vía diferente para la conformación de sistemas agroforestales: manejar la regeneración natural existente en lugar de depender exclusivamente del establecimiento mediante plantas producidas en vivero. La identificación, protección y posterior manejo de individuos juveniles de *J. neotropica* puede favorecer su incorporación progresiva al componente arbóreo de potreros y otras áreas productivas. Sin embargo, su viabilidad dependerá de la protección frente al ramoneo, pisoteo y daños mecánicos, así como de la regulación de la competencia con la vegetación acompañante.

Las interacciones agroforestales tampoco son necesariamente positivas. A medida que los árboles crecen, aumenta su capacidad de interceptar radiación y explorar recursos del suelo, por lo que pueden producirse relaciones competitivas con cultivos y pasturas. La magnitud de estos efectos dependerá de la densidad arbórea, arquitectura y dimensiones de las copas, distribución de las raíces, disponibilidad de agua y nutrientes, características del componente asociado y prácticas de manejo. Esta consideración resulta fundamental para evitar una interpretación exclusivamente favorable de la agroforestería: la sostenibilidad del sistema depende del balance entre procesos de facilitación, complementariedad y competencia.

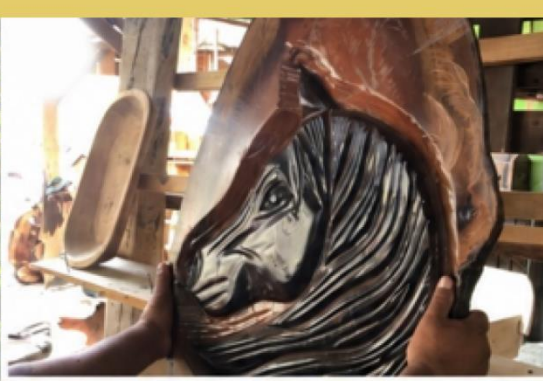
En *J. neotropica*, este balance puede manejarse mediante decisiones silviculturales y agroforestales. El espaciamiento entre árboles, su ubicación dentro de la parcela, la selección de especies asociadas, las podas y el manejo de la regeneración modifican la intensidad de las interacciones. Por ello, no existe una configuración única

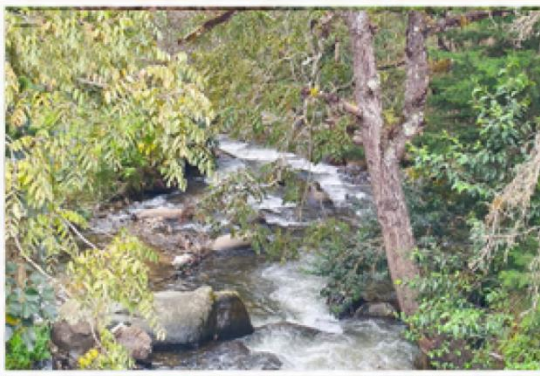
aplicable a todos los sitios. Los arreglos deben responder a los objetivos productivos, las condiciones ecológicas locales y la función asignada al nogal dentro del sistema.

En conjunto, los casos analizados en este capítulo muestran que *J. neotropica* puede integrarse en configuraciones agroforestales diversas, desde sistemas agrosilvícolas y silvopastoriles hasta arreglos multiestrato y huertos tradicionales urbanos. Su contribución no reside únicamente en la producción potencial de madera o frutos, sino también en su participación en la estructura vertical del sistema, regulación temporal de la luz, dinámica de materia orgánica, generación de hábitat y conservación de individuos procedentes de regeneración natural. Al mismo tiempo, estas funciones coexisten con procesos competitivos que requieren manejo.

Por tanto, el valor agroforestal de *J. neotropica* debe entenderse desde una perspectiva funcional y no solamente composicional. Incorporar nogal a un sistema no garantiza por sí mismo beneficios ecológicos o productivos; estos emergen de las relaciones que se establecen entre la especie, los demás componentes, las condiciones ambientales y las decisiones de manejo. Esta perspectiva permite considerar al nogal andino como un componente potencialmente multifuncional de los paisajes productivos, cuya conservación y aprovechamiento pueden articularse mediante sistemas agroforestales adaptados a las condiciones ecológicas y socioproductivas de los Andes ecuatorianos.

CAPÍTULO 11



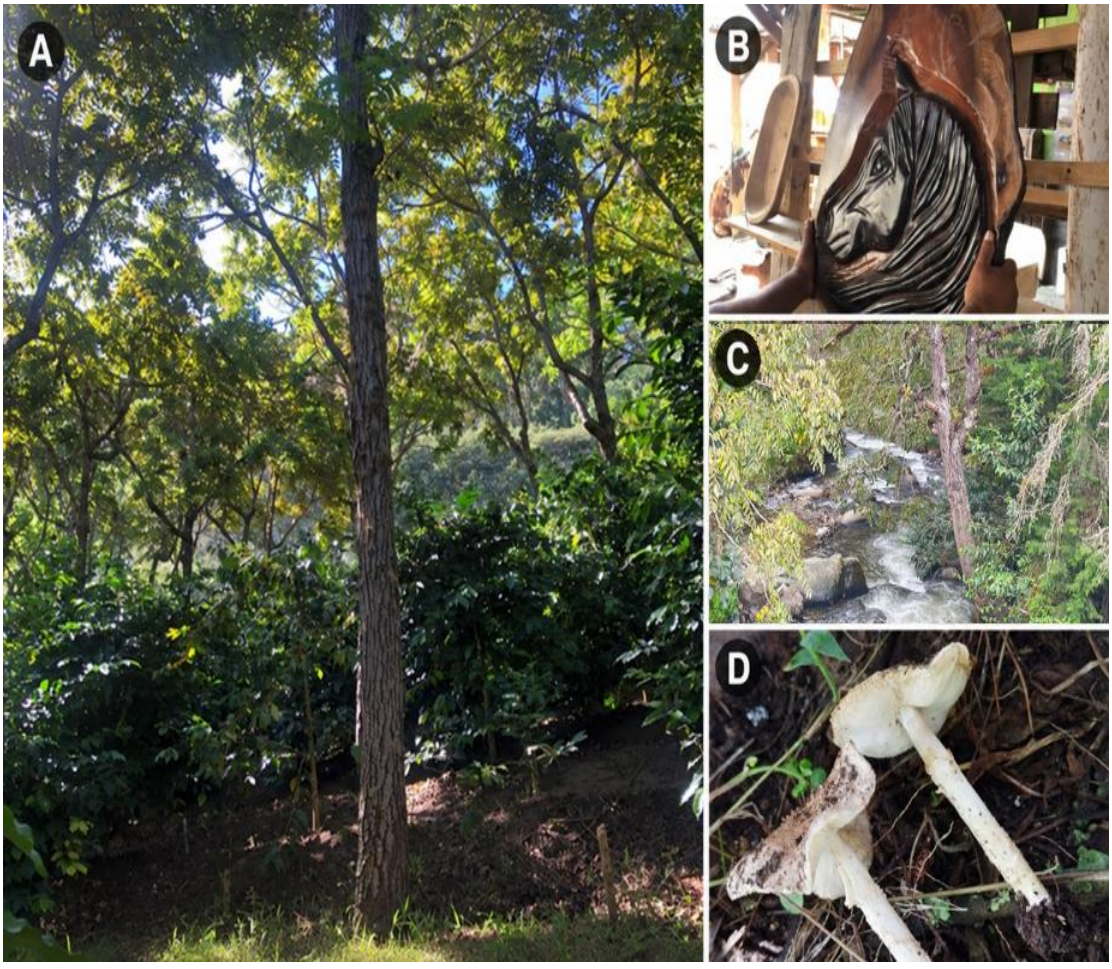


Productos y servicios ecosistémicos de *Juglans neotropica*

Capítulo

11

Productos y servicios ecosistémicos de *Juglans neotropica*



A) Árboles de *J. neotropica* que proporcionan sombra a un cultivo de café en Pimampiro, Imbabura, Ecuador. **B)** Artesanía elaborada con madera de nogal por el artesano Flavio Méndez en Paute, Azuay, Ecuador. **C)** Árbol de *J. neotropica* en la ribera de un curso de agua en Santiago, Loja, Ecuador. **D)** Cuerpos fructíferos de hongos registrados en un sistema agroforestal multiestrato con presencia de *J. neotropica* en Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador. Fotografías A, B y D: Mario Añazco; fotografía C: Luis Granda.

La importancia del nogal andino *Juglans neotropica* trasciende el aprovechamiento maderero, ya que integra valores económicos, ecológicos, sociales y culturales que contribuyen al desarrollo sostenible de los paisajes andinos. La madera representa su producto de mayor valor comercial, reconocida por sus propiedades tecnológicas, estabilidad dimensional, facilidad de transformación y elevada calidad estética, características que sustentan su utilización en ebanistería, carpintería fina, chapas decorativas y otros productos de alto valor agregado. Paralelamente, los productos forestales no madereros derivados de hojas, frutos, semillas, corteza y flores amplían las oportunidades de aprovechamiento mediante aplicaciones alimenticias, nutracéuticas, farmacéuticas, artesanales y textiles.

Desde la perspectiva ecológica, *J. neotropica* participa en diferentes procesos y funciones ecosistémicas relacionados con el almacenamiento de carbono, la provisión de sombra y hábitat, el reciclaje de nutrientes y el mantenimiento de condiciones favorables para la biodiversidad. La magnitud y expresión de estas funciones dependen del contexto ecológico y productivo en el que se desarrolla la especie, incluidas las características del sitio, la estructura de la vegetación y el manejo. En sistemas agroforestales, su incorporación permite integrar funciones productivas y ecológicas que pueden contribuir a la diversificación y sostenibilidad de las unidades productivas.

Durante los últimos años, el conocimiento sobre los productos y servicios ecosistémicos de J. neotropica se ha ampliado mediante investigaciones desarrolladas en universidades ecuatorianas, centros de investigación y, especialmente, a partir de los resultados generados en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). Estos estudios han permitido caracterizar con mayor precisión las propiedades tecnológicas de la madera, identificar productos forestales no madereros y documentar diferentes funciones y oportunidades de aprovechamiento sostenible de la especie.

En este capítulo se integra y sintetiza la evidencia científica disponible sobre los principales productos madereros y no madereros derivados de *J. neotropica*, así como los servicios ecosistémicos que presta en los paisajes andinos. A diferencia de una presentación individual de estudios, la información se organiza en torno a las propiedades tecnológicas, aplicaciones productivas y funciones ecológicas de la especie, permitiendo ofrecer una visión integral de su contribución a la conservación, la bioeconomía y el manejo sostenible de los bosques andinos.

La información presentada en este capítulo proviene de la integración de investigaciones publicadas, tesis de grado y resultados generados por el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), los cuales fueron analizados de manera comparativa con el propósito de identificar patrones tecnológicos, productivos y ecológicos comunes. Cuando existen diferencias entre estudios, estas se interpretan considerando la procedencia geográfica del material, las condiciones ambientales y las metodologías empleadas.

11.1 Productos madereros

La madera de *J. neotropica* constituye el principal producto comercial de la especie y uno de los recursos forestales de mayor valor tecnológico entre las latifoliadas nativas de los Andes ecuatorianos. Su aprovechamiento histórico en ebanistería y carpintería especializada ha estado sustentado en una combinación de propiedades anatómicas, físicas, mecánicas y estéticas que le confieren estabilidad dimensional, facilidad de maquinado y excelente calidad de acabado superficial. Estas características han favorecido su utilización tanto en la pequeña y mediana industria como en la fabricación de productos de alto valor agregado, incluyendo muebles finos, chapas decorativas, pisos, elementos torneados e instrumentos musicales.

El conocimiento tecnológico de esta madera ha avanzado considerablemente durante la última década gracias a investigaciones desarrolladas en diferentes provincias del Ecuador. Los estudios realizados sobre procedencias de Carchi, Imbabura, Chimborazo, Loja y otras localidades han permitido caracterizar integralmente sus propiedades organolépticas, anatómicas, físicas, químicas, mecánicas y de trabajabilidad, evidenciando que parte de la variabilidad observada responde a diferencias ambientales, edáficas y posiblemente genéticas entre poblaciones. Esta información constituye una base científica para orientar el aprovechamiento industrial, la selección de procedencias y el manejo forestal de la especie.

En las siguientes secciones se presenta una síntesis integrada de dichas investigaciones, organizando los resultados según las principales propiedades tecnológicas de la madera y su relación con las aplicaciones industriales. Este enfoque permite interpretar de manera conjunta los hallazgos obtenidos en diferentes estudios, proporcionando una visión más completa sobre el potencial tecnológico de *J. neotropica* como especie forestal de alto valor.

11.1.1 Propiedades organolépticas

Las propiedades organolépticas constituyen el primer nivel de caracterización tecnológica de la madera, ya que comprenden el conjunto de atributos perceptibles mediante los sentidos, tales como el color, olor, sabor, textura, brillo, veteado y grano. Estos caracteres poseen importancia tanto en la identificación de la especie como en la valoración comercial de la madera, debido a que influyen directamente en la aceptación del producto por parte de artesanos, ebanistas, diseñadores e industrias de transformación.

Los estudios realizados durante los últimos años en diferentes procedencias de *J. neotropica* dentro del Programa de Investigación *Juglans* evidencian que estas propiedades presentan una variabilidad moderada asociada principalmente a las condiciones ambientales, edáficas y al origen geográfico del material analizado. Sin embargo, dicha variabilidad no modifica el patrón tecnológico general de la especie, caracterizado por una madera de excelente calidad estética y elevada aptitud para productos de alto valor agregado (Alvarado, 2021; Cartuche, 2022; Carvajal et al., 2023a; MAE 2014b; Portilla, 2025; Villota, 2023; Yamberla, 2023).

Color

El color constituye uno de los atributos de mayor importancia comercial de la madera de *J. neotropica*. En estado verde, la albura presenta tonalidades amarillo pálido (HUE 5Y 8/4), mientras que el duramen exhibe una coloración marrón grisácea (HUE 2.5Y 4/2). Durante el proceso de secado al aire, la albura adquiere tonalidades pardas más oscuras y el duramen evoluciona hacia cafés intensos que, en algunos individuos, se aproximan al negro (referencia Munsell 2.5Y 5/4). Estas variaciones cromáticas incrementan su atractivo para aplicaciones decorativas y explican la elevada valoración de esta especie en ebanistería y carpintería fina (Villota, 2023; Yamberla, 2023).

Olor y sabor

El olor y el sabor muestran variaciones relativamente pequeñas entre procedencias. La madera verde presenta generalmente un olor astringente que disminuye durante el secado, adquiriendo un aroma moderadamente agradable. No obstante, en muestras provenientes de Loja se ha reportado ausencia de olor perceptible. De manera similar, el sabor se describe predominantemente como moderadamente amargo y astringente, aunque en algunas procedencias del norte del Ecuador se registran ligeros matices dulces. Estas diferencias probablemente responden a variaciones en la composición química de los extractivos presentes en la madera (Cartuche, 2022; Villota, 2023).

Textura, brillo, veteado y grano

Los estudios coinciden en describir a *J. neotropica* como una especie de textura media, aunque algunas procedencias presentan una textura ligeramente más fina. El brillo natural varía entre medio e intenso, mientras que el veteado se caracteriza por patrones jaspeados y arcos superpuestos originados por bandas de tejido más denso correspondientes al leño tardío. El grano es predominantemente recto, con ligeras ondulaciones en determinados individuos (Alvarado, 2021; Portilla, 2025; Villota, 2023). Estas características, combinadas con la uniformidad del color del duramen y la facilidad de acabado superficial, confieren a la madera una elevada calidad estética para aplicaciones de alto valor agregado, especialmente en muebles finos, chapas decorativas, marquetería e instrumentos musicales.

En conjunto, la evidencia disponible muestra que las propiedades organolépticas de la madera de *J. neotropica* presentan rasgos coincidentes entre las procedencias evaluadas, junto con variaciones que pueden relacionarse con las características del material y las condiciones de crecimiento. Esta variabilidad puede considerarse al seleccionar la madera según los requerimientos estéticos y funcionales de cada aplicación, sin asumir que las propiedades observadas constituyen valores invariables para toda la especie.

11.1.2 Propiedades anatómicas

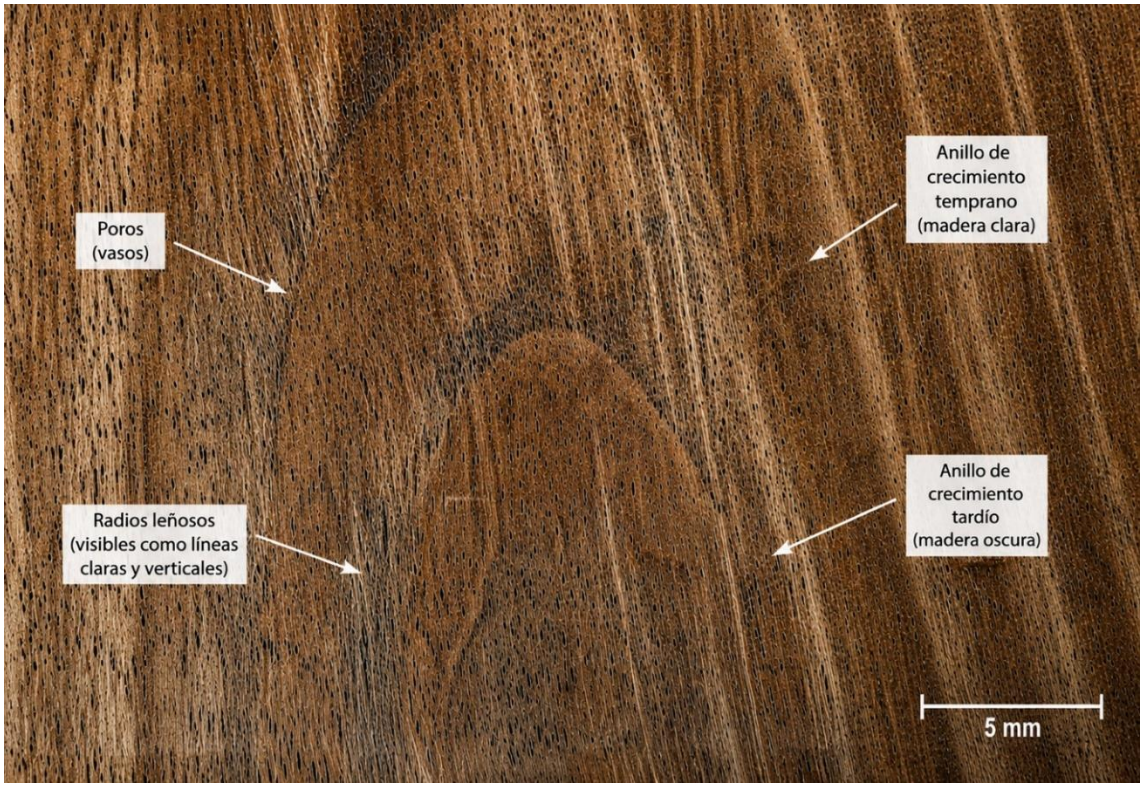
Las propiedades anatómicas de la madera describen la organización y disposición de los tejidos que conforman el xilema secundario y constituyen uno de los principales criterios para la identificación tecnológica de las especies forestales. La caracterización

anatómica comprende el análisis macroscópico y microscópico de elementos como poros, vasos, radios, parénquima, fibras, células radiales, inclusiones y anillos de crecimiento, cuya estructura determina en gran medida el comportamiento físico, mecánico y de trabajabilidad de la madera.

En *J. neotropica*, los estudios anatómicos desarrollados durante los últimos años en diferentes procedencias del Ecuador muestran un patrón estructural relativamente uniforme, aunque con variaciones cuantitativas atribuibles al origen geográfico y a las condiciones ambientales de crecimiento. Las investigaciones realizadas en Chimborazo, Carchi, Loja e Imbabura han permitido complementar la descripción anatómica clásica de la especie y generar una caracterización tecnológica mucho más completa para los Andes ecuatorianos (Alvarado, 2021; Armijos-Montaño, 2017; Cartuche, 2022; Villota, 2023; Villota et al., 2024; Yamberla, 2023).

La caracterización anatómica de *J. neotropica* puede realizarse inicialmente mediante la observación macroscópica de los planos de corte de la madera, en los cuales se distinguen estructuras diagnósticas como poros, radios y anillos de crecimiento. Estas características, que constituyen la base para posteriores análisis microscópicos, se ilustran en la Figura 11.1.

Figura 11.1
Características anatómicas macroscópicas de la madera de Juglans neotropica



Nota. Se observan las principales características anatómicas macroscópicas utilizadas para la identificación de la madera, entre ellas la disposición de los poros, radios y anillos de crecimiento. Adaptado de Villota (2023).

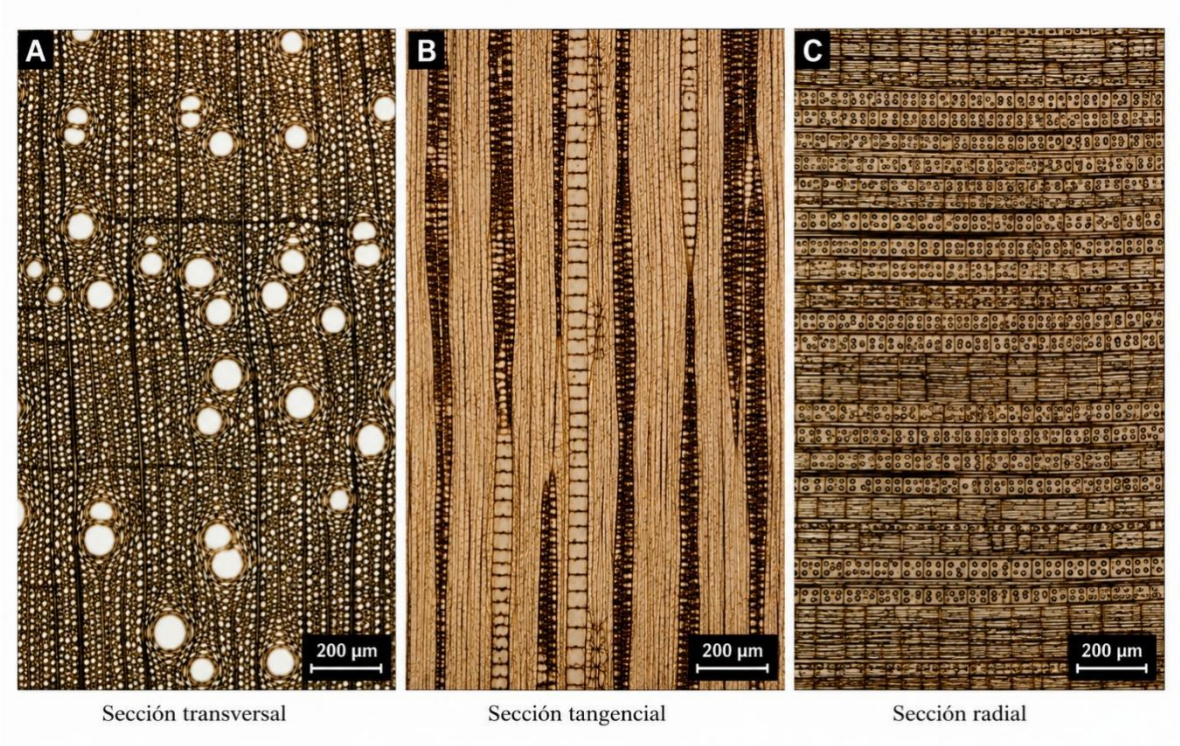
Poros y vasos

La madera de *J. neotropica* presenta porosidad semicircular con distribución radial, característica que facilita la delimitación de los anillos de crecimiento. Los poros son generalmente grandes, de forma circular y predominantemente solitarios (aproximadamente 77 %), aunque ocasionalmente forman múltiples radiales cortos. La presencia frecuente de tílides constituye otro rasgo distintivo de la especie. Microscópicamente, los vasos presentan placas de perforación simples, punteaduras intervasculares alternas de pequeño tamaño (4–7 µm) y una disposición radial bien definida, características que favorecen la conducción hidráulica y contribuyen a la estabilidad tecnológica de la madera (Alvarado, 2021; Cartuche, 2022; Yamberla, 2023).

Estas características pueden observarse con mayor detalle en los planos transversal, tangencial y radial de la madera, los cuales permiten reconocer la disposición y orientación de sus principales elementos anatómicos y constituyen la base para la caracterización microscópica de *J. neotropica* (Figura 11.2).

Figura 11.2

Características anatómicas microscópicas de la madera de Juglans neotropica en los tres planos de corte



Nota. **A)** Sección transversal; **B)** sección tangencial; **C)** sección radial. Las microfotografías muestran la organización anatómica de la madera en los tres planos principales utilizados para su caracterización microscópica. Adaptado de Yamberla (2023).

Radios, parénquima y células radiales

Los radios leñosos se caracterizan por ser predominantemente uniseriados, con anchos que varían entre una y tres series celulares y la presencia de radios de dos tamaños diferentes. El cuerpo del radio está constituido principalmente por células procumbentes, acompañadas por células verticales y cuadradas en los márgenes. El parénquima presenta cierta variabilidad entre procedencias, describiéndose como axial paratraqueal unilateral en muestras de Carchi y como apotraqueal dispuesto en bandas finas en materiales provenientes de Chimborazo.

Por su parte, en los remanentes boscosos del sur del país (cantón Loja), Armijos-Montaño et al. (2017) corroboraron esta plasticidad estructural al identificar una coexistencia de parénquima axial con una marcada tendencia hacia la porosidad difusa en una combinación de vasos múltiples y solitarios. Los autores destacan que el conocimiento riguroso de estos planos microscópicos —evaluados bajo el estándar internacional de la IAWA— es el pilar fundamental que determina la aptitud tecnológica de la madera local, influyendo directamente en su comportamiento durante el secado, su trabajabilidad artesanal y el diseño de planes de manejo silvicultural para la región austral.

De manera similar, las células radiales muestran predominio de formas procumbentes, aunque también se han registrado células envolventes y verticales, diferencias que reflejan la variabilidad anatómica propia de las distintas procedencias evaluadas (Alvarado, 2021; Armijos-Montaño, 2017; Cartuche, 2022; Villota, 2023).

La estructura anatómica de la madera de *J. neotropica* también puede presentar variaciones cuantitativas asociadas con las condiciones del sitio. Cabrera Malla (2024), al comparar individuos establecidos en los sectores norte, centro y sur de la ciudad de Loja, identificó al nogal como una especie de sensibilidad anatómica intermedia, con cuatro variables afectadas por el sitio. En el conjunto de las especies evaluadas, las diferencias entre localidades se manifestaron principalmente en características cuantitativas, particularmente en el diámetro de los vasos y de las punteaduras, mientras que los rasgos cualitativos conservaron mayor estabilidad. Estos resultados sugieren cierto grado de plasticidad anatómica de la madera frente a las condiciones ambientales de crecimiento, aspecto que debe considerarse al comparar materiales procedentes de diferentes sitios.

Anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento constituyen una de las características anatómicas más relevantes de *J. neotropica*. Son claramente visibles a simple vista y presentan una organización asociada con la actividad del cámbium vascular. Las investigaciones recientes desarrolladas en Ecuador y Perú evidencian que su formación responde principalmente a procesos fisiológicos relacionados con la fenología de la especie, especialmente la defoliación, más que a variaciones directas de precipitación o temperatura. Estudios realizados en Loja demostraron que la defoliación induce la formación de bandas de células aplanadas que permiten identificar episodios de estrés fisiológico, mientras que periodos moderados de déficit hídrico no generan anillos completos. Por otra parte, investigaciones dendroecológicas en Perú no encontraron relaciones significativas entre precipitación, temperatura y crecimiento radial, sugiriendo

la intervención de otros factores ecológicos y fisiológicos. Asimismo, se ha observado que la presencia de anillos incompletos puede constituir un indicador de afectaciones fitosanitarias, al coincidir con estados sanitarios regulares o deficientes de los árboles (Egües Nicoletti, 2021; Ordóñez, 2024; Villota et al., 2024; Yamberla, 2023).

Fibras e inclusiones

Las fibras de *J. neotropica* corresponden principalmente al tipo libriforme y presentan septos bien definidos, condición que contribuye a la resistencia mecánica y a la buena respuesta de la madera durante los procesos de transformación industrial. Entre las inclusiones celulares se ha registrado la presencia de gomas y células oleíferas, componentes que forman parte de la composición anatómica característica de la especie y que podrían influir tanto en algunas propiedades físicas como en la presencia de compuestos extractivos de interés tecnológico (Alvarado, 2021).

En conjunto, la evidencia anatómica disponible confirma que *J. neotropica* posee una estructura leñosa altamente diferenciada y consistente con una madera de elevada calidad tecnológica. Aunque existen diferencias menores entre procedencias, la organización de sus tejidos mantiene un patrón anatómico estable, lo que facilita su identificación macroscópica y microscópica y explica, en buena medida, el comportamiento favorable observado posteriormente en las propiedades físicas, mecánicas y de trabajabilidad. La integración de estudios realizados en diferentes regiones del Ecuador ha permitido consolidar una de las descripciones anatómicas más completas disponibles para esta especie andina, aportando información relevante tanto para la tecnología de la madera como para programas de manejo, conservación y utilización sostenible.

11.1.3 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de la madera determinan buena parte de su comportamiento durante el secado, procesamiento y utilización final. Entre las variables de mayor importancia tecnológica se encuentran el contenido de humedad, las diferentes expresiones de densidad y las contracciones longitudinal, radial, tangencial y volumétrica. La relación entre las contracciones tangencial y radial (T/R) constituye, además, un indicador utilizado para interpretar la estabilidad dimensional de la madera. En *J. neotropica*, los estudios realizados con material procedente de diferentes regiones del Ecuador permiten reconocer variaciones entre procedencias que deben considerarse al caracterizar tecnológicamente la especie.

La información disponible comprende diferentes propiedades físicas evaluadas en materiales procedentes de Carchi, Imbabura, Chimborazo y Loja. Las variables relacionadas con el contenido de humedad y la densidad permiten establecer comparaciones entre las cuatro procedencias, mientras que las contracciones longitudinal, radial, tangencial y volumétrica disponen de información directamente comparable para Carchi e Imbabura. Esta evidencia permite analizar la variabilidad física de la madera según su procedencia e identificar patrones relevantes para su procesamiento y utilización.

Contenido de humedad y densidad

Las diferencias más evidentes entre las cuatro procedencias se presentan en el contenido inicial de humedad y en los distintos tipos de densidad. Las muestras provenientes de Carchi e Imbabura registraron contenidos de humedad de 78,92 % y 72,98 %, respectivamente, superiores a los observados en Loja (59,57 %) y Chimborazo (53,12 %). Estos resultados evidencian una variación importante en el contenido de agua del material evaluado; sin embargo, su interpretación debe considerar las condiciones particulares de muestreo, almacenamiento y estado de humedad de las probetas utilizadas en cada investigación.

La densidad verde presentó un intervalo relativamente estrecho, con valores de 0,81 a 0,90 g/cm³. Loja registró el mayor valor (0,90 g/cm³), seguida por Carchi (0,88 g/cm³), Imbabura (0,85 g/cm³) y Chimborazo (0,81 g/cm³). En contraste, al considerar la densidad básica, Chimborazo presentó el valor más elevado (0,61 g/cm³), mientras que Imbabura (0,49 g/cm³) y Loja (0,46 g/cm³) registraron valores inferiores. Estas diferencias ponen de manifiesto que la comparación tecnológica entre procedencias no debe sustentarse exclusivamente en la densidad verde, debido a la influencia que ejerce el contenido de humedad sobre esta variable.

La misma tendencia observada para la densidad básica se mantiene en las determinaciones de densidad seca al aire y seca al horno, en las cuales las muestras de Chimborazo alcanzaron 0,65 y 0,64 g/cm³, respectivamente. En conjunto, los resultados evidencian diferencias físicas entre procedencias y sugieren variabilidad en la estructura y comportamiento tecnológico de la madera de *J. neotropica*. No obstante, la atribución de estas diferencias a factores climáticos, edáficos o genéticos requiere estudios específicamente diseñados para separar el efecto de cada componente.

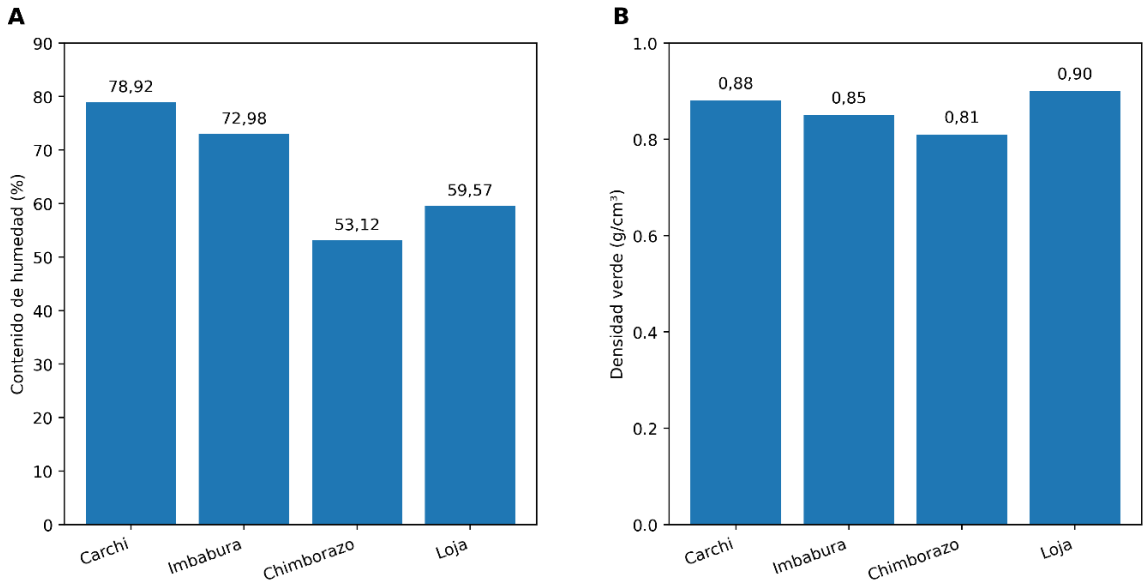
Comparación entre procedencias

La comparación conjunta de las propiedades evaluadas evidencia que ninguna procedencia puede considerarse superior para todas las variables físicas analizadas. Chimborazo destaca por sus mayores valores de densidad básica y densidades en condición seca, mientras que Loja y Carchi presentan las mayores densidades en estado verde, y Carchi e Imbabura los contenidos iniciales de humedad más elevados. Por tanto, más que establecer una clasificación absoluta de calidad entre procedencias, estos resultados muestran diferentes comportamientos físicos que pueden adquirir distinta importancia según el procesamiento y uso final de la madera.

El contenido inicial de humedad presenta una variación más amplia entre procedencias que la densidad verde, como se observa en la Figura 11.3, donde ambas propiedades se representan en escalas independientes para facilitar su comparación.

Figura 11.3

Contenido de humedad y densidad verde de la madera de Juglans neotropica en cuatro procedencias del Ecuador



Nota. **A)** Contenido de humedad inicial (%); **B)** densidad verde (g/cm³) de muestras procedentes de Carchi, Imbabura, Chimborazo y Loja. Elaborado por los autores a partir de la recopilación, análisis y sistematización de la información utilizada en el capítulo.

Contracción y estabilidad dimensional

La información disponible para Carchi e Imbabura permite profundizar en el comportamiento dimensional de la madera durante la pérdida de humedad. La contracción longitudinal fue ligeramente superior en Imbabura, con valores de 0,32 % para la contracción normal y 0,65 % para la total, frente a 0,24 % y 0,57 % registrados en Carchi. En cambio, las contracciones radial y tangencial fueron superiores en las muestras procedentes de Carchi: 5,49 % y 7,12 % para las contracciones normales, y 6,79 % y 7,93 % para las totales, respectivamente. En Imbabura, los valores correspondientes fueron 3,39 % y 5,22 % para las contracciones normales, y 4,82 % y 7,15 % para las totales (Villota, 2023; Yamberla, 2023). Los valores de Imbabura coinciden con los reportados en la tabla de resultados de Yamberla.

Estas diferencias se reflejan también en la contracción volumétrica total, que alcanzó 14,16 % en Carchi y 11,63 % en Imbabura. En consecuencia, las muestras procedentes de Carchi presentaron una mayor contracción volumétrica durante el secado, mientras que las de Imbabura registraron menores contracciones radial, tangencial y volumétrica.

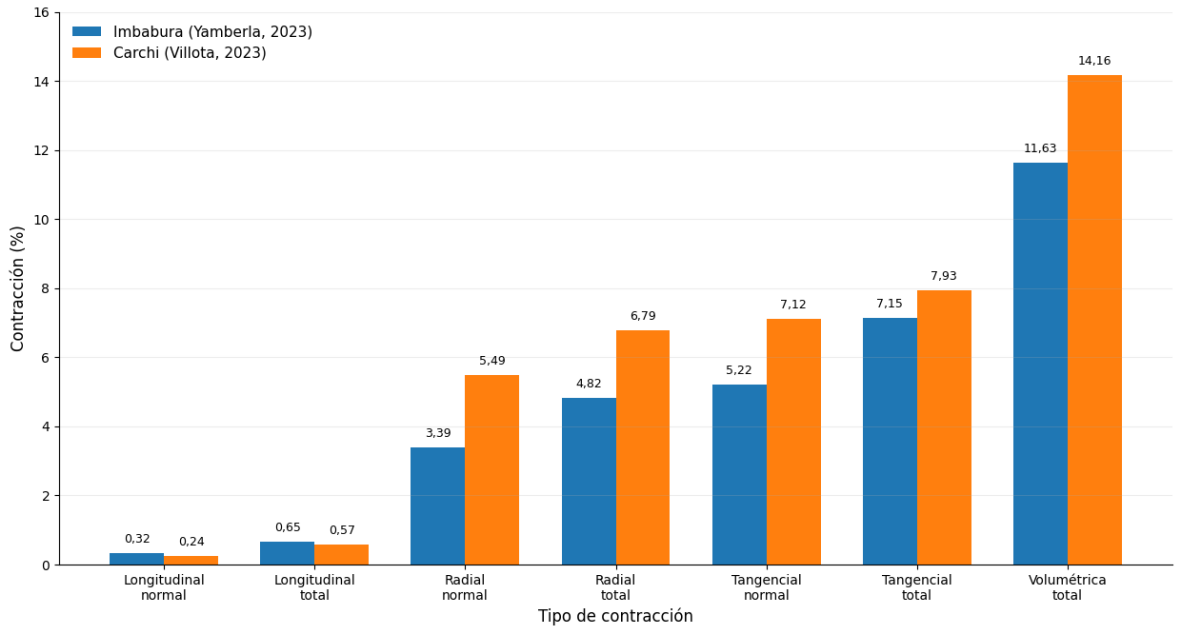
La relación tangencial/radial (T/R) constituye un indicador complementario de la estabilidad dimensional de la madera. Yamberla (2023) reportó para Imbabura un valor T/R de 1,56 en la tabla de resultados. En el caso de Carchi, Villota (2023) registró una relación T/R de 0,80; sin embargo, este valor presenta una inconsistencia con las

contracciones tangencial total (7,93 %) y radial total (6,79 %) reportadas en la misma investigación y con la fórmula T/R definida en su metodología. **Por esta razón, la relación T/R no se utiliza en este capítulo para establecer comparaciones entre las procedencias de Carchi e Imbabura.**

El comportamiento comparativo de las contracciones longitudinal, radial, tangencial y volumétrica de las procedencias de Carchi e Imbabura se presenta en la Figura 11.4. La comparación evidencia mayores contracciones radial, tangencial y volumétrica en las muestras de Carchi, mientras que Imbabura presenta valores ligeramente superiores únicamente en la contracción longitudinal.

Figura 11.4

Contracción y estabilidad dimensional de la madera de Juglans neotropica en dos procedencias del Ecuador



Nota. Se comparan las contracciones longitudinal, radial y tangencial —normal y total— y la contracción volumétrica total de muestras de madera procedentes de Carchi e Imbabura. Elaborado a partir de Yamberla (2023) y Villota (2023).

Como referencia regional, información sistematizada recientemente por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre del Perú (SERFOR, 2026) reporta para madera de *J. neotropica* procedente de Chalaco, Piura, una densidad básica de 0,50 g/cm³, valor comprendido dentro del intervalo registrado para las procedencias ecuatorianas analizadas en este capítulo. Para esta procedencia peruana se registraron contracciones radial, tangencial, volumétrica y longitudinal de 3,64 %, 5,24 %, 8,47 % y 0,09 %, respectivamente, y una relación tangencial/radial (T/R) de 1,44. Estos valores amplían el marco regional de referencia sobre el comportamiento físico de la madera de la especie, aunque su comparación con los resultados de Ecuador debe realizarse considerando las diferencias de procedencia, material evaluado y condiciones de los respectivos estudios.

En conjunto, los estudios disponibles muestran que la madera de *J. neotropica* presenta variabilidad entre procedencias tanto en densidad como en comportamiento dimensional. Esta variación posee implicaciones para el secado, maquinado y selección del material según su destino. Los resultados constituyen, además, una base para futuras investigaciones orientadas a determinar en qué medida estas diferencias responden al ambiente de crecimiento, la edad y las características individuales de los árboles.

11.1.4 Propiedades químicas

La composición química de la madera constituye un componente fundamental de su comportamiento tecnológico, debido a que la proporción de sus constituyentes estructurales y no estructurales se relaciona con características como la resistencia, durabilidad y respuesta frente a los procesos de transformación. En *J. neotropica*, la información disponible para Ecuador comprende principalmente la determinación de holocelulosa, lignina, extractivos y cenizas, así como mediciones del pH de la madera.

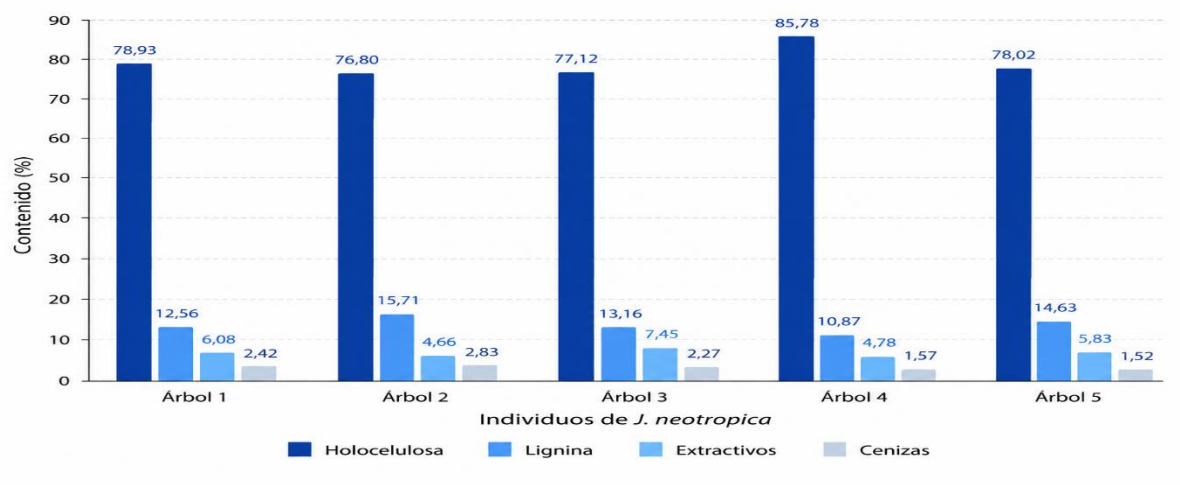
Valverde-Rodríguez et al. (2020) caracterizaron la composición química de la madera de cinco individuos de *J. neotropica* procedentes de un ecosistema forestal húmedo de Valladolid, provincia de Zamora Chinchipe, en el sur del Ecuador. Los resultados mostraron un claro predominio de la **holocelulosa**, con un promedio de 79,31 %, seguida por la **lignina** (13,39 %), los **extractivos** (5,76 %) y las **cenizas** (1,94 %).

La elevada proporción de holocelulosa evidencia el predominio de los componentes polisacáridos estructurales de la madera, mientras que la lignina representa el segundo componente en importancia cuantitativa. Los extractivos, aunque presentes en menor proporción, constituyen una fracción de interés tecnológico por su participación en diferentes características químicas de la madera. Las cenizas representan la fracción mineral y registraron la menor participación porcentual entre los componentes analizados. La variación observada entre los cinco árboles estudiados evidencia, además, que la composición química no es completamente uniforme entre individuos de una misma procedencia.

La distribución de estos cuatro componentes en los cinco individuos evaluados se presenta en la Figura 11.5, lo que permite visualizar tanto el predominio de la holocelulosa como la variabilidad individual registrada para los demás constituyentes químicos.

Figura 11.5

Composición química de la madera de Juglans neotropica en cinco individuos procedentes de Valladolid, Ecuador



Nota. Valores porcentuales de holocelulosa, lignina, extractivos y cenizas determinadas en cinco individuos de *J. neotropica* procedentes de Valladolid, Zamora Chinchipe. Adaptado de Valverde-Rodríguez et al. (2020).

En relación con la acidez de la madera, Alvarado (2021), mediante muestras procedentes de Alausí, provincia de Chimborazo, determinó un **pH de 5,42**, correspondiente a una condición ligeramente ácida. Este parámetro complementa la caracterización química de la especie y constituye una propiedad relevante para comprender su comportamiento durante determinados procesos de transformación y acabado.

En conjunto, los resultados disponibles proporcionan una primera caracterización de la composición química de la madera de *J. neotropica* en Ecuador. Sin embargo, la evidencia procede de un número limitado de localidades y estudios, por lo que todavía no permite establecer patrones de variación química entre procedencias. La ampliación de estos análisis hacia otras poblaciones, edades y condiciones ambientales permitiría determinar la magnitud de la variabilidad intraespecífica y su posible relación con las propiedades físicas, mecánicas y de trabajabilidad de la madera.

11.1.5 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas expresan la capacidad de la madera para resistir fuerzas externas sin experimentar deformaciones o fallas que comprometan su utilización. Su caracterización resulta fundamental para establecer las posibilidades de uso de *J. neotropica*, particularmente en aplicaciones donde el material está sometido a esfuerzos de flexión, compresión, tracción o cizallamiento.

En Ecuador, Paguay (2013) evaluó las propiedades físico-mecánicas de *J. neotropica* mediante ensayos de **flexión estática, dureza Brinell, cizallamiento, tracción y compresión paralela y perpendicular al grano**. Las pruebas se realizaron en

tres condiciones de humedad: madera verde (CH > 30 %), seca al aire y seca al horno, permitiendo analizar la respuesta mecánica del material en diferentes estados de acondicionamiento.

Resistencia mecánica y condición de humedad

Los resultados evidenciaron diferencias en la resistencia de la madera asociadas con su condición de humedad. En términos generales, Paguay (2013) determinó que la madera secada al horno presentó mayor resistencia mecánica que la madera secada al aire, comportamiento que pone de manifiesto la importancia del acondicionamiento del material previo a su utilización.

La respuesta mecánica varió también según el tipo de esfuerzo aplicado, lo que confirma el carácter anisotrópico de la madera y la necesidad de considerar de manera diferenciada las propiedades de flexión, dureza, cizallamiento, compresión y tracción. En este contexto, la evaluación conjunta realizada por Paguay (2013) permitió **clasificar la resistencia mecánica de la madera de *J. neotropica* como media a alta**. Asimismo, según su dureza, la madera fue clasificada como **blanda en estado verde y semidura en condición seca al aire y seca al horno**.

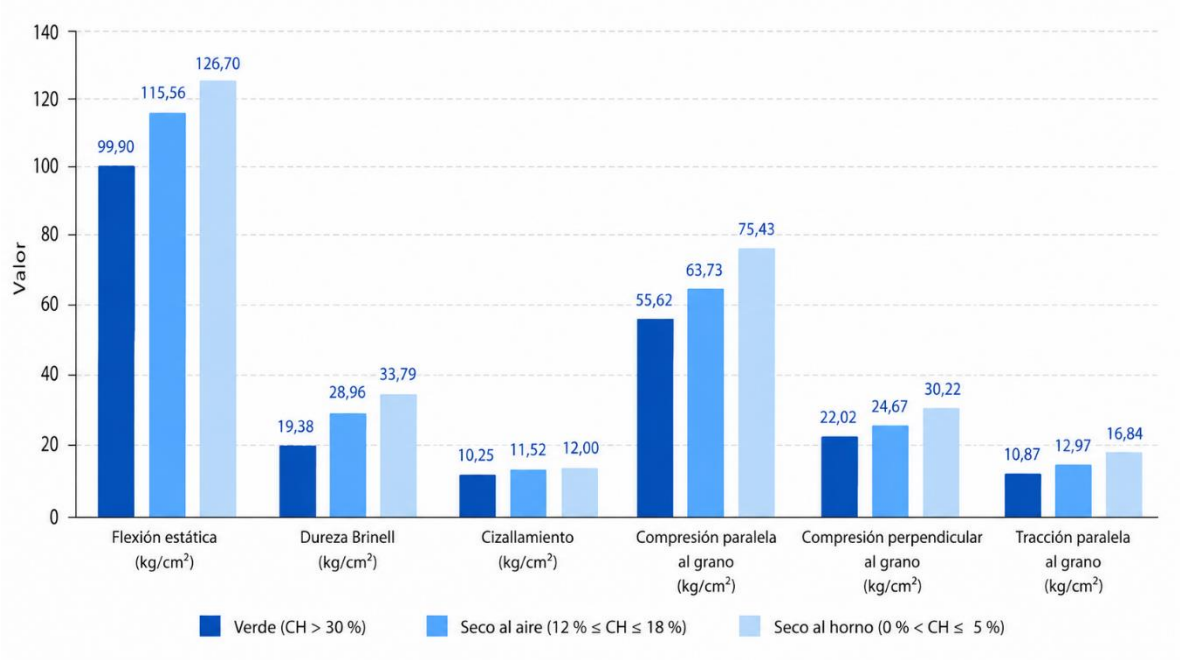
Como referencia complementaria para la región andina, SERFOR (2026) sistematizó información físico-mecánica de madera de *J. neotropica* procedente de Chalaco, Piura, Perú. En flexión estática se reportaron valores de 313,6 kg/cm² para el esfuerzo en el límite proporcional (ELP), 531,3 kg/cm² para el módulo de ruptura (MOR) y 83 700 kg/cm² para el módulo de elasticidad (MOE). En compresión paralela al grano se registraron valores de 212,4 kg/cm² para el ELP, 271,5 kg/cm² para la resistencia máxima y 104 900 kg/cm² para el MOE, mientras que en compresión perpendicular el ELP alcanzó 39,1 kg/cm². La ficha incluye además resultados de cizallamiento, dureza, tenacidad, clivaje y extracción de clavos, ampliando la información disponible sobre el comportamiento mecánico de la especie fuera del Ecuador.

Estos resultados adquieren relevancia tecnológica al relacionarse con el comportamiento de la madera durante su transformación. La misma investigación ubicó al nogal en el **grupo I de trabajabilidad, correspondiente a un comportamiento muy bueno**, y señaló un comportamiento favorable durante el secado. La integración de estas características físico-mecánicas permitió proponer usos en carpintería, encofrados, obras civiles, duelas, postes, tablones, mangos de herramientas, juguetería, vigas, artesanías y estructuras talladas, además de aplicaciones específicas en ebanistería y laminados.

El comportamiento de las principales propiedades mecánicas de la madera en las tres condiciones de humedad evaluadas se presenta en la Figura 11.6, permitiendo visualizar las diferencias asociadas tanto al tipo de esfuerzo como al estado de acondicionamiento del material.

Figura 11.6

Propiedades mecánicas de la madera de Juglans neotropica en diferentes condiciones de humedad



Nota. Valores correspondientes a ensayos de flexión estática, dureza Brinell, cizallamiento, compresión paralela y perpendicular al grano y tracción, realizados en madera verde, seca al aire y seca al horno. Adaptado de Paguay (2013).

En conjunto, la evidencia disponible caracteriza a *J. neotropica* como una madera de **resistencia mecánica media a alta, con buena respuesta al secado y favorable comportamiento durante su transformación**, atributos que respaldan su utilización en productos con diferentes requerimientos tecnológicos. Paguay (2013) destaca, además, que por sus características físico-mecánicas, estéticas, anatómicas y de trabajabilidad, el nogal presentó un mayor número de usos probables que las otras especies evaluadas en su investigación.

No obstante, estos resultados corresponden a las condiciones y material evaluados en una investigación específica. Por ello, su extrapolación a la especie en todo el Ecuador debe realizarse con cautela. La evaluación de otras procedencias permitiría establecer el rango de variación de las propiedades mecánicas y determinar su relación con la densidad, contenido de humedad, edad de los árboles y condiciones de crecimiento.

11.1.6 Propiedades de trabajabilidad

La trabajabilidad de la madera expresa su respuesta frente a diferentes operaciones de transformación y constituye un atributo tecnológico determinante para establecer su aptitud para carpintería, ebanistería y otros procesos de manufactura. En *J. neotropica*, las investigaciones realizadas en Ecuador han evaluado principalmente el **cepillado, lijado, moldurado, taladrado y torneado**, considerando la incidencia de defectos como

grano arrancado, levantado y velloso y, según el ensayo, la orientación de corte y la dirección de trabajo respecto del grano.

Los ensayos efectuados bajo criterios de la norma ASTM D1666-87 utilizaron una escala de cinco grados de calidad, desde **grado 1 (excelente, sin defectos)** hasta **grado 5 (muy malo, con elevada presencia de fibra levantada y grano desgarrado)**. Este criterio permite integrar los resultados obtenidos en las distintas operaciones de maquinado y valorar conjuntamente el comportamiento tecnológico de la madera.

Cepillado y lijado

En el **cepillado**, la respuesta de la madera varió según la dirección de trabajo respecto del grano. Yamberla (2023) registró una velocidad promedio de alimentación de 9,62 m/min y realizó evaluaciones a favor y en contra del grano. A favor del grano predominaron las categorías excelente, buena y regular para los defectos de grano arrancado, levantado y velloso; en contra del grano se mantuvo un comportamiento semejante, aunque con presencia ocasional de grados 4 y 5, indicativos de una menor calidad superficial. La metodología consideró probetas con orientaciones tangencial, radial y oblicua y repeticiones tanto a favor como en contra del grano.

El **lijado** mostró igualmente un comportamiento favorable. En los ensayos reportados por Villota (2023), la utilización inicial de lija de grano 60 produjo resultados concentrados principalmente en los grados 1 y 2, con menor presencia de los grados 3 y 4. Con lija de grano 100, los resultados se mantuvieron mayoritariamente entre los grados 1 y 3, con escasa presencia del grado 4. En conjunto, estos resultados indican una buena respuesta de *J. neotropica* al acondicionamiento superficial mediante lijado.

Moldurado, taladrado y torneado

El **moldurado** presentó resultados de excelentes a buenos cuando el procesamiento se realizó a favor del grano. El grano arrancado se concentró principalmente en el grado 1, mientras que el grano levantado y velloso se ubicó predominantemente en el grado 2. Al trabajar en contra del grano aumentó la presencia de los grados 2 y 3 para los defectos de grano levantado y velloso, aunque el grano arrancado permaneció principalmente en grado 1. En términos generales, la madera mostró una respuesta favorable al moldurado (Yamberla, 2023).

En el **taladrado**, los defectos observados en los puntos de entrada y salida correspondieron principalmente a los grados 1 y 2, con menor incidencia de los grados 3 y 4 para grano arrancado, levantado y velloso (Villota, 2023). Este ensayo se efectuó mediante perforaciones localizadas a 5 cm del borde de las probetas, evaluando posteriormente la calidad de las superficies resultantes.

En el **torneado**, la evaluación consideró igualmente los defectos de grano arrancado, velloso y levantado conforme a los criterios de ASTM D1666-87. La metodología utilizó probetas orientadas en diferentes planos y tres gubias de distintas dimensiones para conformar progresivamente la superficie torneada.

En el **torneado**, la madera de *J. neotropica* presentó un comportamiento favorable, con predominio del grado 2 en los tres tipos de grano evaluados. El defecto más relevante fue el grano velloso, susceptible de corrección posterior mediante lijado con grano 100 (Villota, 2023). El proceso de torneado y las características de las probetas utilizadas en este ensayo se ilustran en la Figura 11.7.

Figura 11.7

Ensayo de torneado de madera de Juglans neotropica en la Central de Innovación Maderera del campus Yuyucocha, Imbabura

Nota. Probetas de madera durante el ensayo de trabajabilidad mediante torneado. Adaptado de Villota (2023).

Considerados conjuntamente, los ensayos muestran un comportamiento favorable de la madera frente a las diferentes operaciones de maquinado. Los resultados se concentran principalmente en los grados de mejor desempeño de la escala de evaluación, aunque la magnitud de los defectos varía según el tipo de operación y las condiciones de procesamiento (Figura 11.8).

Figura 11.8

Comportamiento de la madera de Juglans neotropica en diferentes ensayos de trabajabilidad

Nota. Los grados corresponden a la escala de evaluación empleada en los ensayos de trabajabilidad: 1 = excelente, 2 = bueno, 3 = regular, 4 = malo y 5 = muy malo. Los rangos representados indican las categorías predominantes reportadas para cepillado, lijado, moldurado, taladrado y torneado; no corresponden a valores promedio. Elaborado a partir de Yamberla (2023) y Villota (2023).

En conjunto, los ensayos evidencian una **trabajabilidad favorable de la madera de *J. neotropica***, con predominio de resultados entre excelentes y buenos en varias operaciones de maquinado, aunque la calidad superficial puede disminuir en determinadas orientaciones y cuando el procesamiento se realiza en contra del grano. Esta tendencia coincide con Paguay (2013), quien ubicó al nogal en el **grupo I de trabajabilidad, correspondiente a un comportamiento muy bueno** frente al trabajo con máquinas de carpintería. En consecuencia, la combinación de buen comportamiento en cepillado, lijado, moldurado, taladrado y torneado sustenta su aptitud para aplicaciones que requieren precisión y calidad de acabado, particularmente en carpintería, ebanistería, artesanías y productos torneados.

11.1.7 Durabilidad natural

La durabilidad natural constituye una propiedad tecnológica relevante para definir las condiciones de utilización de la madera, debido a que expresa su capacidad para resistir el deterioro durante la exposición a agentes bióticos y ambientales sin la aplicación de tratamientos preservantes. Su evaluación permite orientar los usos potenciales del material y determinar la necesidad de medidas de protección cuando estará sometido a condiciones favorables para su degradación.

En *J. neotropica*, Cunduri (2026) evaluó experimentalmente la durabilidad natural de la albura y el duramen bajo las condiciones edafoclimáticas del campus Yuyucocha,

Ibarra. La investigación empleó el método de cementerio de estacas durante seis meses, con evaluaciones mensuales de las probetas expuestas al suelo. El estudio consideró, entre otras variables, la densidad básica y la pérdida de peso como indicadores del comportamiento de la madera frente al deterioro.

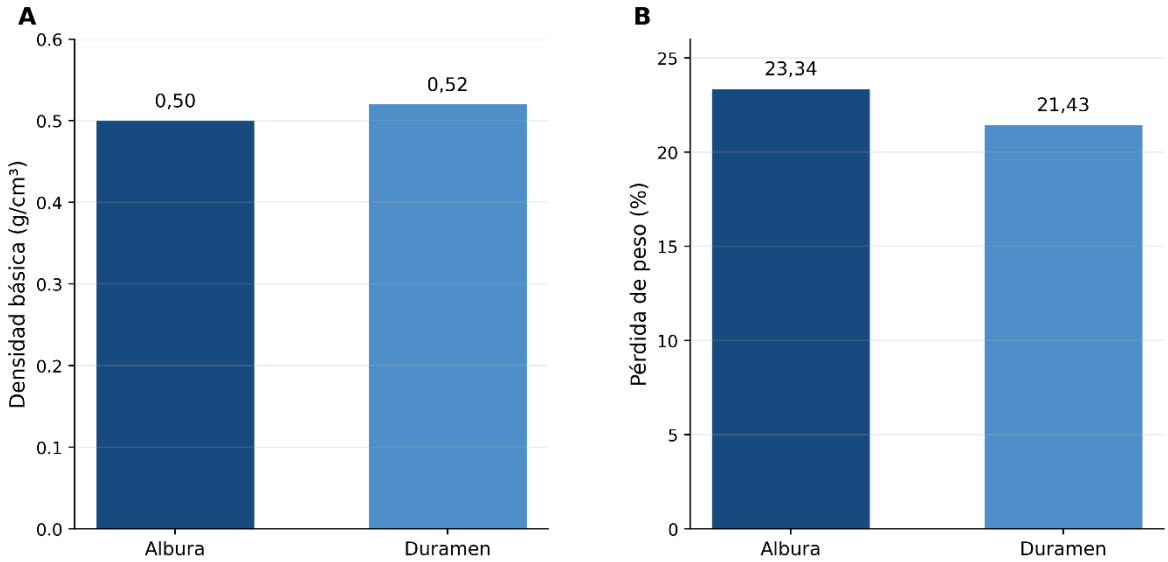
La densidad básica alcanzó **0,50 g/cm³ en la albura y 0,52 g/cm³ en el duramen**, valores que corresponden a una madera de densidad media. Las diferencias entre ambos componentes fueron, por tanto, reducidas para esta propiedad. Estos valores son además consistentes con el intervalo de densidad media reportado para la especie en otros estudios analizados previamente en este capítulo.

La respuesta frente a la exposición al suelo mostró una pérdida de peso de **23,34 % en la albura y 21,43 % en el duramen**. Aunque el duramen presentó una pérdida numéricamente menor, el análisis estadístico no evidenció diferencias significativas entre los componentes de la madera (albura y duramen); en consecuencia, los resultados disponibles no permiten afirmar que el duramen de *J. neotropica* haya presentado una durabilidad natural estadísticamente superior a la albura durante el período evaluado.

La comparación entre albura y duramen muestra diferencias reducidas en la densidad básica y una pérdida de peso ligeramente mayor en la albura después del período de exposición, como se observa en la Figura 11.9.

Figura 11.9

Densidad básica y pérdida de peso de la albura y el duramen de la madera de Juglans neotropica



Nota. **A)** Densidad básica (g/cm³); **B)** pérdida de peso (%) de la albura y el duramen después de seis meses de evaluación mediante el método de cementerio de estacas en el campus Yuyucocha, Ibarra. Elaborado a partir de Cunduri (2026).

La interpretación de la durabilidad varió según el criterio de clasificación empleado. Con base en la densidad básica, el estudio ubicó a *J. neotropica* en una categoría de **baja durabilidad (Clase IV)**; en cambio, considerando la pérdida de peso registrada durante el ensayo, la madera fue clasificada como **resistente (Clase B)**. Esta diferencia evidencia que la caracterización de la durabilidad natural no debería sustentarse en un único indicador y que los resultados deben interpretarse en función del método y de las condiciones específicas de exposición.

En conjunto, estos resultados aportan una **primera referencia experimental sobre la durabilidad natural de la madera de *J. neotropica* bajo condiciones de contacto con el suelo en el norte del Ecuador**. No obstante, debido a que el ensayo se desarrolló durante seis meses y bajo las condiciones edafoclimáticas específicas del campus Yuyucocha, los resultados deben interpretarse dentro de este contexto experimental. Estudios de mayor duración, con diferentes procedencias y condiciones de exposición, permitirán establecer con mayor precisión la durabilidad natural de la especie y definir criterios tecnológicos para su preservación y uso.

11.1.8 Usos de la madera

La integración de las propiedades organolépticas, anatómicas, físicas, químicas, mecánicas, de trabajabilidad y durabilidad analizadas en las secciones anteriores permite establecer un amplio espectro de aplicaciones para la madera de *J. neotropica*. Su coloración característica, apariencia estética, resistencia mecánica de media a alta y favorable comportamiento frente a diferentes operaciones de maquinado explican su reconocimiento histórico como una madera apreciada para **ebanistería, carpintería y elaboración de artesanías**, usos que continúan documentándose en Ecuador (Paguay, 2013; Villota et al., 2024).

Desde el punto de vista normativo, la madera de *J. neotropica* ha sido ubicada dentro del **grupo C**, correspondiente a maderas con densidad básica mayor de 0,40 y menor de 0,55 g/cm³. Para este grupo se contemplan aplicaciones en contrachapados, aglomerados, estructuras simples, puertas, ventanas y zócalos, así como determinados productos de madera de menor dimensión. Su utilización estructural requiere el tratamiento y la clasificación correspondientes de acuerdo con las condiciones de servicio (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Los resultados de trabajabilidad analizados previamente amplían estas posibilidades de aprovechamiento. El buen comportamiento observado en **cepillado, lijado, moldurado, taladrado y torneado**, junto con la posibilidad de obtener superficies de acabado favorable, respalda su utilización en productos de mayor elaboración y valor agregado. Entre ellos destacan los **muebles y la ebanistería fina, artesanías, elementos torneados, chapas decorativas, marquetería, juguetería e instrumentos musicales de cuerda**. Estos usos son consistentes con los señalados históricamente para la especie por Estrada (1997) y con la caracterización tecnológica realizada por Paguay (2013).

En conjunto, la evidencia disponible caracteriza a *J. neotropica* como una **madera versátil y de alto valor para procesos de transformación**, cuya aptitud tecnológica

deriva de la combinación de sus características estéticas, resistencia mecánica y favorable trabajabilidad. No obstante, la selección del uso final debe considerar la procedencia y variabilidad de sus propiedades, así como las condiciones de exposición del producto. En particular, los resultados recientes sobre durabilidad natural indican la conveniencia de considerar medidas de protección o preservación cuando la madera se destine a condiciones de servicio que favorezcan su deterioro (Cunduri, 2026).

11.2 Productos forestales no madereros (PFNM)

El aprovechamiento de *J. neotropica* trasciende la producción de madera e involucra diferentes órganos de la planta, entre ellos hojas, corteza, flores, frutos y semillas. Estas estructuras constituyen materias primas para la obtención de **tintes naturales, aceites, extractos y formulaciones de uso tópico**, además de sustentar preparaciones gastronómicas y productos con potencial nutracéutico y medicinal.

La evidencia disponible muestra diferentes niveles de transformación de estos recursos, desde prácticas tradicionales vinculadas al aprovechamiento de colorantes y alimentos hasta procesos de extracción, formulación, microencapsulación y caracterización de compuestos bioactivos. Esta diversidad amplía las posibilidades de valorización de la especie y permite considerar los PFNM como un componente estratégico para diversificar el aprovechamiento del nogal andino y promover una bioeconomía vinculada a su conservación y manejo sostenible.

11.2.1 Tintes naturales

La corteza, las hojas y el pericarpio de los frutos de *J. neotropica* constituyen fuentes de colorantes naturales utilizados principalmente en el teñido de fibras y otros materiales. Si bien su aprovechamiento posee una larga tradición en los Andes —aspecto desarrollado desde una perspectiva histórica y cultural en el capítulo 3—, los estudios tecnológicos recientes han permitido caracterizar **la variación del color, su estabilidad, la eficiencia de diferentes órganos vegetales, las condiciones del proceso de tinción y el rendimiento productivo del tinte**.

Materia prima y características cromáticas

El comportamiento tintóreo varía de acuerdo con el órgano vegetal utilizado. En fibras de alpaca (*Vicugna pacos*), los extractos obtenidos de corteza, hojas y frutos, combinados con piedra alumbre como mordiente, produjeron tonalidades diferenciadas que pudieron ser estandarizadas mediante el sistema Munsell y códigos hexadecimales. La corteza produjo una tonalidad 7.5YR 5/6 (#9f6d3e), las hojas 5YR 5/6 (#a86957) y el fruto 7.5YR 8/2 (#d7bfad), evidenciando la posibilidad de obtener y reproducir diferentes respuestas cromáticas a partir de una misma especie (Guerra, 2022).

Las diferencias entre órganos no se limitan al color obtenido. Los extractos presentan variaciones en parámetros asociados con su concentración y composición: las hojas registraron un índice de refracción de 3,00 °Brix y un pH de 4,40, mientras que la corteza presentó 1,00 °Brix y el fruto alcanzó un pH de 3,78 (Guerra, 2022). De manera

concordante, Masias Bröcker (2007) encontró que el porcentaje de sólidos, el pH y la absorción de radiación ultravioleta varían principalmente según la parte del árbol utilizada y, en menor medida, según la clase diamétrica. En este último estudio, **las hojas presentaron el mejor desempeño como materia prima para la obtención del colorante**.

La pulpa del fruto representa otra fuente de pigmentos con aplicaciones específicas. Terán (2015) identificó un flavonoide asociado con tonalidades amarillas que evolucionaron hacia verdes oscuros por oxidación. El colorante mostró buena solidez al frote y al planchado y elevada solubilidad en agua, aunque su afinidad tintórea disminuyó con el tiempo debido a procesos de autooxidación. La pulpa fresca representó el 53,64 % del peso del fruto y se redujo a 8,21 % después del secado.

La diversidad cromática obtenida mediante diferentes órganos de la planta se resume en la Tabla 11.1.

Tabla 11.1

Características cromáticas de tintes obtenidos de diferentes órganos de Juglans neotropica aplicados a fibra de alpaca

Materia prima	Mordiente	Código Munsell	Código hexadecimal
Corteza	Piedra alumbre	7.5YR 5/6	#9f6d3e
Hojas	Piedra alumbre	5YR 5/6	#a86957
Fruto	Piedra alumbre	7.5YR 8/2	#d7bfad

Nota. Caracterización cromática de fibras de alpaca teñidas con extractos de diferentes órganos de *J. neotropica*. Adaptado de Guerra (2022).

Calidad del teñido y respuesta de las fibras

La eficacia del tinte depende también del material textil, del mordiente y de la dirección particular del proceso. Los ensayos realizados con fibra de alpaca mostraron alta solidez a la luz en los tratamientos evaluados, sin evidencias importantes de decoloración; las hojas produjeron la mayor resistencia de la fibra y la corteza la mayor tensión máxima. El tratamiento basado en hojas presentó además la mejor relación beneficio-costo, con un valor de 1,73 (Guerra, 2022).

Los resultados obtenidos en distintos tipos de fibras muestran que la respuesta no es uniforme. La revisión realizada por Flores (2021) señala que la combinación del colorante con mordientes como sal, limón, alumbre y vinagre permite obtener diferentes tonalidades y mejorar la firmeza del color mediante reutilizaciones sucesivas del baño de tinción. La lana de oveja presentó, en términos generales, colores más intensos y estables que la fibra de alpaca. Masias Bröcker (2007) llegó a una conclusión similar al identificar a la lana ovina como el sustrato de mejor desempeño para la intensidad y estabilidad del color.

La comparación con otros colorantes naturales aporta información adicional sobre su desempeño. Frente al amaranto, el tinte de nogal presentó mayor resistencia a la tensión en fibra de alpaca —1 128,03 frente a 962,82 N/cm²—, mejor solidez al frote en seco y una relación beneficio-costo superior, de 1,51 frente a 1,32. Aunque el amaranto produjo mayor intensidad cromática, el nogal mostró un comportamiento global más favorable en los indicadores evaluados (Núñez, 2021).

Condiciones del proceso de tinción

La temperatura constituye otro factor determinante de la respuesta cromática. En lana de oveja teñida con extracto de hojas, temperaturas comprendidas entre 30 y 100 °C modificaron progresivamente la intensidad y tonalidad del color. Por debajo de 60 °C predominaron tonalidades marrón amarillentas, mientras que por encima de 70 °C se obtuvieron tonos marrón rojizos. La relación entre temperatura y variación del color presentó un ajuste elevado ($R^2 = 0,98$), lo que evidencia la importancia de controlar esta variable para estandarizar el proceso de tinción (Luna Chávez, 2015).

Además de las aplicaciones textiles, el colorante obtenido del fruto ha sido evaluado en formulaciones cosméticas. En ensayos *in vitro* sobre cabello, la formulación con 15 % de extracto produjo la tonalidad más oscura y presentó la mejor permanencia después del lavado en comparación con concentraciones de 5 y 10 % (Cayetano, 2018).

Productividad del tinte en bosques naturales

Los estudios más recientes amplían el análisis desde la calidad del producto hacia su **productividad potencial en poblaciones naturales**, aspecto particularmente relevante para evaluar al tinte como PFNM. En el Bosque Protector El Tundo, Loja, Moreno (2024) registró 36 individuos de *J. neotropica* con DAP ≥ 10 cm por hectárea. A partir de 640 frutos maduros, equivalentes a 62,5 kg de biomasa fresca, obtuvo 9,51 L de tinte, con un promedio de 2,38 ± 0,61 L por árbol y una productividad estimada de **85,68 L/ha**.

En el bosque nativo La Victoria, Macará, Palacios-Herrera (2025) registró 31 individuos/ha y evaluó siete árboles productores. El rendimiento medio alcanzó **11,1 L de tinte por árbol**, con valores entre 8,04 y 14,16 L. La investigación también mostró que la productividad puede estar condicionada por variables climáticas, fenológicas y silviculturales, así como por el consumo de frutos por fauna. La limitada regeneración natural observada en el sitio evidencia, además, que el aprovechamiento del fruto como PFNM debe vincularse con criterios de manejo que aseguren la persistencia de la población.

En conjunto, los estudios disponibles muestran que **la productividad y calidad del tinte de *J. neotropica* dependen de la materia prima vegetal, el tipo de fibra, los mordientes y las condiciones del proceso de extracción y tinción**. Las hojas presentan ventajas para determinados procesos textiles, mientras que el fruto adquiere especial relevancia cuando se analiza el potencial productivo a escala de árbol y bosque. Esta

complementariedad permite considerar los colorantes naturales de *J. neotropica* como un PFNM con posibilidades de desarrollo artesanal y tecnológico, siempre que su aprovechamiento se articule con criterios de conservación y regeneración de la especie.

11.2.2 Aceites

Las semillas de *J. neotropica* constituyen una fuente de aceite vegetal caracterizada por una elevada proporción de ácidos grasos insaturados. Los estudios realizados en Ecuador han abordado tanto la **extracción y caracterización fisicoquímica del aceite** como el desarrollo de tecnologías para mejorar su estabilidad y conservación, particularmente mediante microencapsulación. En conjunto, estos resultados muestran posibilidades de valorización de la nuez como materia prima para productos alimentarios y de mayor transformación tecnológica (Albán Gordillo, 2015; Chusquillo, 2014).

Extracción y composición del aceite

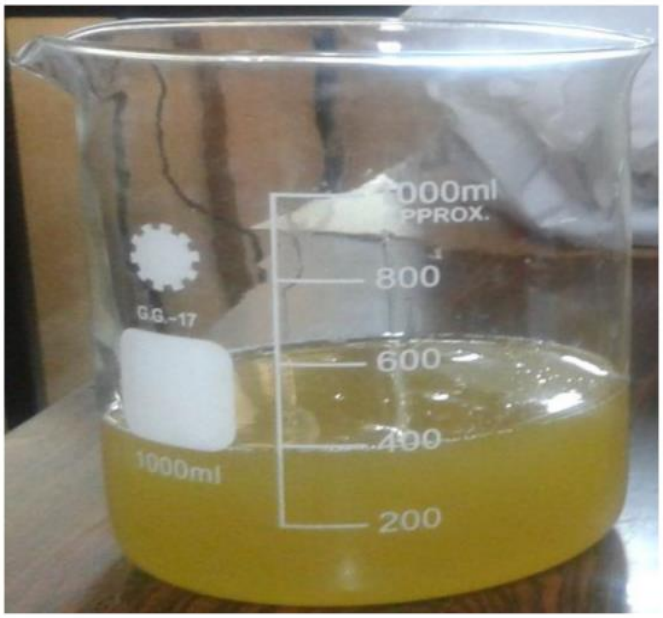
El aceite obtenido de la nuez presenta un perfil lipídico predominantemente insaturado. Chusquillo (2014) reportó un **93,4 % de ácidos grasos insaturados**, con predominio del ácido linoleico (69,93 %), acompañado por ácido oleico, palmítico y γ-linolénico. Los parámetros fisicoquímicos evaluados —densidad, índice de refracción, acidez, peróxidos, yodo y saponificación— se encontraron dentro de los rangos de referencia utilizados en la investigación, mientras que las características organolépticas obtenidas respaldaron su potencial para aplicaciones alimentarias.

El proceso mediante prensado hidráulico alcanzó un rendimiento reportado de **92,17 %** y permitió obtener directamente el aceite de la nuez. La investigación estimó además un costo de producción de **USD 18,67/L**, aportando una primera referencia sobre las condiciones técnicas y económicas de obtención del producto a la escala considerada en el estudio (Chusquillo, 2014).

El producto obtenido mediante el proceso de extracción presenta las características visuales que se observan en la Figura 11.10.

Figura 11.10

Aceite de semillas de Juglans neotropica obtenido mediante extracción por prensado



Nota. Aceite recién extraído de semillas de *J. neotropica*. Tomado de Chusquillo (2014).

Microencapsulación y estabilidad

La elevada proporción de ácidos grasos insaturados constituye una característica nutricional de interés, pero también plantea la necesidad de proteger el aceite frente a procesos de deterioro oxidativo. En este contexto, Albán Gordillo (2015) evaluó la **microencapsulación del extracto lipídico de semillas de *J. neotropica*** como estrategia tecnológica para su estabilización. El procedimiento alcanzó una eficiencia de encapsulación de **65,21 %** y un rendimiento de **79,19 %**.

Las microcápsulas obtenidas presentaron tamaños de partícula entre **2,38 y 2,69 µm**, morfología esférica y ausencia de poros superficiales. El contenido de humedad aumentó de 1,46 % a los dos días a 1,99 % a los ocho días y 3,56 % a los quince días, proporcionando información sobre el comportamiento del producto durante el período de evaluación (Albán, 2015).

Los resultados de extracción, caracterización y microencapsulación muestran que el aceite de *J. neotropica* constituye un **PFNM con posibilidades de transformación y generación de valor agregado**. Su elevada proporción de ácidos grasos insaturados favorece su interés como ingrediente alimentario y como materia prima para posteriores desarrollos tecnológicos. La microencapsulación representa, a su vez, una alternativa para proteger el extracto lipídico y facilitar su incorporación en diferentes formulaciones. Las implicaciones nutricionales y el potencial nutracéutico de estos componentes se analizan específicamente en el apartado **11.2.6 Potencial nutracéutico**, evitando duplicar aquí esa información.

11.2.3 Extractos

Los diferentes órganos de *J. neotropica* constituyen fuentes de metabolitos secundarios susceptibles de recuperación mediante procesos de extracción. Las investigaciones disponibles han evaluado principalmente **hojas, corteza, flores masculinas, frutos y pericarpio**, mediante extractos alcohólicos, hidroalcohólicos y acuosos, con el propósito de caracterizar su composición fitoquímica y explorar diferentes respuestas biológicas. En conjunto, estos estudios evidencian que tanto el órgano vegetal como el método y las condiciones de extracción influyen en la naturaleza y concentración de los compuestos obtenidos.

Composición fitoquímica y condiciones de extracción

Los análisis fitoquímicos realizados en diferentes órganos de *J. neotropica* han identificado una diversidad de metabolitos secundarios. En extractos alcohólicos de hojas, corteza y frutos se ha reportado la presencia de **triterpenos, antocianidinas, quinonas, cumarinas y saponinas**, mientras que en flores masculinas, hojas y corteza se identificaron también catequinas y compuestos grasos. De manera complementaria, se ha registrado la presencia de alcaloides, flavonoides, azúcares reductores y taninos, así como principios amargos y astringentes en extractos acuosos (Moyón, 2020).

La presencia de **compuestos fenólicos y flavonoides** también ha sido confirmada en extractos de hojas, lo que refuerza el interés de este órgano como fuente de metabolitos secundarios con potencial para posteriores procesos de valorización (Huachaca Laura, 2017).

Las condiciones de extracción constituyen un factor determinante para la recuperación de estos compuestos. En el pericarpio del fruto, Chusquillo (2014) evaluó el efecto de la **concentración de etanol y el tiempo de maceración**, así como su interacción, sobre la extracción de compuestos fenólicos. El mayor contenido alcanzó **54,28 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g de peso seco**, bajo condiciones de etanol al 30 %, 24 horas de maceración y agitación.

Este resultado amplía las posibilidades de aprovechamiento integral del fruto. Mientras la **semilla constituye la materia prima para la obtención del aceite** analizado en el apartado anterior, el **pericarpio puede valorizarse como fuente de compuestos fenólicos**, además de su utilización como materia prima para la obtención de tintes naturales.

Bioactividad de los extractos

La caracterización de los extractos de *J. neotropica* se ha extendido a la evaluación de algunas respuestas biológicas. Los extractos acuosos obtenidos de diferentes órganos mostraron actividad hemaglutinante frente a los grupos sanguíneos A, O y B Rh+, con una respuesta mayor para el grupo O y menor para A Rh+. Entre los órganos evaluados, la corteza presentó la mayor actividad y las hojas la menor, comportamiento relacionado en la investigación con la posible presencia de aglutininas

capaces de reconocer carbohidratos específicos de la membrana de los eritrocitos (Moyón, 2020).

Los extractos alcohólicos mostraron asimismo **actividad antibacteriana *in vitro***, cuya intensidad varió de acuerdo con el órgano vegetal y el microorganismo evaluado. Las flores masculinas y la corteza presentaron las respuestas inhibitorias más destacadas, particularmente frente a *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*, mientras que la actividad fue menor frente a *Pseudomonas aeruginosa* y *Klebsiella pneumoniae* (Moyón, 2020). Estos resultados constituyen evidencia experimental de bioactividad bajo condiciones específicas de laboratorio y **no deben interpretarse como demostración de eficacia terapéutica**.

La actividad antioxidante ha sido evaluada principalmente en extractos de hojas. En material recolectado en Ancash, Perú, los análisis de un extracto hidroalcohólico mostraron una elevada presencia de compuestos fenólicos, particularmente taninos y flavonoides, y porcentajes de inhibición del radical DPPH superiores al **90 %** a concentraciones de 25 y 35 µg/mL. El extracto presentó un **IC_{50} de 12,82 µg/mL** y una capacidad antioxidante equivalente a **255,07 mg de Trolox por gramo de extracto seco**, evidenciando una actividad antioxidante relevante bajo las condiciones experimentales evaluadas (Aranda-Ventura et al., 2016; Hurtado Manrique et al., 2015).

En conjunto, los estudios disponibles muestran que **hojas, corteza, flores masculinas y pericarpio de *J. neotropica* constituyen fuentes de metabolitos secundarios susceptibles de recuperación mediante procesos de extracción**. La presencia de compuestos fenólicos, flavonoides, taninos, quinonas, cumarinas, saponinas y otros constituyentes, junto con las respuestas antioxidantes y antibacterianas observadas experimentalmente, sustenta el interés de estos materiales para investigaciones orientadas al desarrollo de productos de mayor valor agregado. No obstante, la evidencia disponible continúa siendo limitada y metodológicamente heterogénea; por ello, se requieren estudios que estandaricen los procesos de extracción, caractericen los principales compuestos obtenidos y evalúen su bioactividad específicamente en *J. neotropica*.

11.2.4 Gel

Los extractos vegetales de *J. neotropica* han sido incorporados en formulaciones semisólidas de uso tópico, representando un nivel de transformación adicional respecto de los extractos analizados en el apartado anterior. Quiróz (2013) desarrolló experimentalmente un gel constituido por extractos de nogal, ortiga (*Urtica dioica*) y sábila (*Aloe vera*), y evaluó sus características fisicoquímicas, microbiológicas y su actividad cicatrizante en un modelo animal.

La formulación contenía **30 % de extractos vegetales en total**, incorporados a una base compuesta por Carbopol 940, trietanolamina, dimeticona, agua y conservantes. Se evaluaron tres combinaciones: **F1: 10 % nogal, 10 % ortiga y 10 % sábila; F2: 15 % nogal, 10 % ortiga y 5 % sábila; y F3: 20 % nogal, 5 % ortiga y 5 % sábila**. De esta manera, las tres formulaciones mantuvieron constante el 30 % total de extractos, variando únicamente la proporción correspondiente a cada especie vegetal.

El producto terminado fue sometido a controles organolépticos, fisicoquímicos y microbiológicos. La investigación reportó un **pH de 6,32 y ausencia de microorganismos contaminantes**, mientras que los parámetros evaluados cumplieron con los criterios de calidad utilizados en el estudio para este tipo de formulaciones.

La actividad cicatrizante fue evaluada mediante heridas inducidas en ratones (*Mus musculus*), comparando las tres formulaciones con un control negativo y con Lamoderm® como medicamento de referencia. Las formulaciones F1 y F2 mostraron los tiempos más cortos de cicatrización, mientras que F3 presentó un comportamiento semejante al medicamento de referencia. En ausencia de tratamiento, el cierre de la herida requirió aproximadamente 13 días.

El análisis histopatológico mostró **60 % de regeneración celular en los grupos tratados con las tres formulaciones del gel**, frente a 40 % en el control con Lamoderm® y 20 % en el control negativo, de acuerdo con la escala empleada en la investigación. En los tejidos tratados con los geles se observó epitelización, abundancia de fibroblastos y fibras de colágeno asociadas con el proceso de reparación de las heridas.

En conjunto, los resultados documentan la factibilidad tecnológica de incorporar extractos de J. neotropica en una formulación tópica experimental. Sin embargo, debido a que las tres formulaciones combinaron simultáneamente nogal, ortiga y sábila, el efecto cicatrizante observado no puede atribuirse de manera independiente a J. neotropica. Esta limitación fue reconocida indirectamente por la propia investigación al recomendar evaluar posteriormente los extractos de forma individual y estudiar otras formulaciones.

11.2.5 Gastronomía y productos alimenticios

La semilla comestible de *J. neotropica*, conocida en Ecuador como **tocte**, constituye uno de los principales productos forestales no madereros de la especie. Su utilización comprende tanto el consumo directo como su incorporación en preparaciones tradicionales y productos alimenticios de mayor grado de transformación. El valor histórico y patrimonial asociado a estas preparaciones se analiza en el capítulo 3; en esta sección se enfatizan sus **aplicaciones gastronómicas y posibilidades de transformación alimentaria**.

El tocte se consume crudo, tostado o incorporado en panes, dulces, salsas y otras preparaciones. Su composición, caracterizada por una proporción importante de lípidos y proteínas, así como por la presencia de ácidos grasos insaturados, favorece su utilización como ingrediente en diferentes productos alimenticios (Campoverde Villalta & Pañi Largo, 2022; Valverde, 2016). Los estudios gastronómicos señalan además características organolépticas que facilitan su incorporación en preparaciones dulces y saladas.

Transformación del tocte

La transformación de la semilla ha permitido obtener productos intermedios como **harina, pasta y esencia de tocte**, ampliando sus posibilidades de utilización en repostería, pastelería, masas, cremas y otras preparaciones. Estos procesos facilitan la incorporación del fruto en diferentes formulaciones y pueden contribuir a diversificar las

formas de conservación y comercialización de la materia prima (Borja Zhicay & Quituisaca Barros, 2020; Rosales Acosta, 2009).

Otro grupo de desarrollos corresponde a productos vegetales elaborados a partir del tocte, entre ellos **bebidas tipo leche, preparaciones tipo queso y mantequilla vegetal**. Las investigaciones realizadas han explorado su incorporación en diferentes preparaciones culinarias y reportan características sensoriales favorables, particularmente relacionadas con textura y sabor (Campoverde Villalta y Pañi Largo, 2022; Vaca Benavides, 2022).

El tocte también ha sido utilizado en productos de confitería y chocolatería. La combinación con cacao fino de aroma (*Theobroma cacao*) permitió desarrollar una **pasta artesanal tipo gianduja**, cuya evaluación sensorial mostró aceptación favorable, especialmente en los atributos de sabor y textura (Méndez Ramírez y Jordán Mayorga, 2025).

En preparaciones saladas, la **pasta de tocte** ha sido incorporada en vinagretas, *dips*, *chutneys* y diferentes tipos de salsas. Las evaluaciones sensoriales realizadas con estos productos reportaron aceptación favorable en atributos como aroma, color y textura, además del cumplimiento de los parámetros microbiológicos considerados en la investigación (Figueroa Chele & Freire Villamar, 2019).

Productos alimenticios con valor agregado

La incorporación del tocte en formulaciones que combinan diferentes materias primas andinas muestra posibilidades adicionales de transformación. En la elaboración de **turrón duro con quinua (*Chenopodium quinoa*) y almendra de nogal**, la formulación influyó en las características sensoriales, fisicoquímicas y en el rendimiento del producto, registrándose además estabilidad microbiológica durante el período evaluado (Sandoval Valles y Venegas Cervantes, 2009).

También se ha incorporado tocte en **barras alimenticias elaboradas con quinua y chía**, buscando combinar diferentes fuentes de nutrientes y ácidos grasos esenciales. En este caso, conviene interpretar el producto como una formulación multicomponente y no atribuir al tocte por sí solo las propiedades nutricionales correspondientes a los demás ingredientes, particularmente a la chía (Alvarez Jaramillo, 2017).

La utilización del tocte en la gastronomía comercial todavía presenta posibilidades de expansión. Un estudio realizado en establecimientos gastronómicos de Quito encontró que su empleo se concentraba principalmente en postres, aunque los participantes manifestaron interés en incorporarlo a nuevas preparaciones. Las evaluaciones sensoriales efectuadas mediante grupos focales registraron una aceptación cercana al **90 %** en los productos evaluados (Erazo Bilbao, 2012).

En conjunto, la evidencia disponible muestra que el tocte posee **versatilidad como materia prima alimentaria**, desde su consumo directo hasta la elaboración de harinas, pastas, bebidas vegetales, productos de confitería, salsas y formulaciones combinadas con otras materias primas. Esta diversidad de aplicaciones representa una vía

para incrementar el grado de transformación y valor agregado de un PFNM de *J. neotropica*, aunque la viabilidad tecnológica, nutricional, microbiológica y económica debe evaluarse específicamente para cada producto.

11.2.6 Potencial nutracéutico

La semilla de *J. neotropica* presenta características nutricionales y una composición química que permiten considerar su **potencial como materia prima para el desarrollo de productos nutracéuticos y alimentos funcionales**. Este interés se sustenta principalmente en su contenido de lípidos, proteínas y ácidos grasos insaturados, así como en la presencia de compuestos con actividad antioxidante. No obstante, estas características deben diferenciarse de la demostración de efectos fisiológicos o terapéuticos, para los cuales se requieren estudios específicos.

Composición nutricional de la semilla

La caracterización proximal de la almendra de *J. neotropica* evidencia que los **lípidos constituyen su componente mayoritario**, acompañados por una proporción importante de proteínas. Los estudios analizados reportan aproximadamente **60 % de grasa y 15 % de proteína**, además de fibra y otros componentes, configuración que caracteriza al tocte como un alimento de elevada concentración energética y con posibilidades de aprovechamiento como ingrediente en formulaciones alimentarias (Valverde, 2016).

La fracción lipídica destaca particularmente por su elevada proporción de **ácidos grasos insaturados**. Los análisis del aceite de la semilla reportaron **93,4 % de ácidos grasos insaturados**, con predominio del ácido linoleico (69,93 %), además de ácido oleico y otros ácidos grasos presentes en menores proporciones (Chusquillo, 2014). Estos resultados, analizados desde el punto de vista tecnológico en el apartado 11.2.2, adquieren aquí relevancia por la composición nutricional de la fracción lipídica.

Proteínas y calidad nutricional

La fracción proteica constituye otro componente de interés. Los estudios disponibles han evaluado tanto su contenido como características relacionadas con su calidad nutricional, entre ellas la composición de aminoácidos y la digestibilidad. Específicamente, análisis de caracterización proteica determinaron que la almendra de *J. neotropica* presenta un contenido de proteína bruta del 17,7 %, donde las albúminas constituyen la fracción mayoritaria (34,38 %), seguidas por las glutelinas (28,71 %), globulinas (25,13 %) y prolaminas (11,78 %) (León, 2016). Evaluada mediante un modelo de digestibilidad gastrointestinal simulada *in vitro*, esta matriz proteica exhibió una elevada susceptibilidad a la hidrólisis enzimática, alcanzando una digestibilidad del 84,15 % e induciendo la liberación de péptidos de bajo peso molecular con capacidad antioxidante (León, 2016). En este sentido, la combinación de proteínas y lípidos insaturados amplía las posibilidades de utilización de la semilla en el desarrollo de ingredientes y formulaciones alimentarias de mayor valor agregado.

Aquí mantendría **los valores específicos de aminoácidos y digestibilidad únicamente si están claramente respaldados por la fuente primaria**. No los reconstruiría desde información secundaria del capítulo, porque en un apartado nutracéutico es especialmente importante diferenciar contenido químico medido de interpretaciones sobre calidad proteica.

Compuestos fenólicos y actividad antioxidante

El potencial funcional de *J. neotropica* no se limita a su composición proximal. Diferentes investigaciones han identificado **compuestos fenólicos, flavonoides y taninos** en órganos de la especie. En extractos hidroalcohólicos de hojas se han registrado porcentajes de inhibición del radical DPPH superiores al **90 %** a determinadas concentraciones, con un IC_{50} de 12,82 µg/mL y una capacidad antioxidante equivalente a 255,07 mg de Trolox por gramo de extracto seco (Aranda-Ventura et al., 2016; Hurtado Manrique et al., 2015).

Esta caracterización de las hojas se ha extendido recientemente al análisis de sus fracciones volátiles. Mediante el análisis cromatográfico (GC-MS) del aceite esencial foliar extraído por arrastre de vapor, Ramos Cevallos et al. (2024) identificaron como constituyentes principales al fitol, α-pineno, D-limoneno y copaeno**.** Los ensayos químicos revelaron una capacidad antioxidante regular, con valores de IC_{50} de 52,25 µL/mL (DPPH) y 34,65µmL/mL (ABTS); sin embargo, el estudio reportó una nula actividad biológica frente a cepas micóticas patógenas como *Candida albicans*.

En el pericarpio del fruto también se ha demostrado la presencia de compuestos fenólicos, cuya recuperación depende de las condiciones de extracción. Chusquillo (2014) obtuvo un máximo de **54,28 mg EAG/100 g de peso seco** bajo las condiciones experimentales previamente descritas. Estos resultados amplían el interés desde la semilla hacia otras fracciones del fruto que podrían ser valorizadas como fuentes de compuestos bioactivos.

Sin embargo, la **actividad antioxidante demostrada mediante ensayos químicos *in vitro* no equivale por sí misma a un efecto antioxidante comprobado en el organismo humano**. Por ello, estos resultados deben considerarse evidencia de potencial bioactivo y no una demostración de beneficios clínicos.

Perspectivas para el desarrollo nutracéutico

En conjunto, la elevada proporción de lípidos y ácidos grasos insaturados, el contenido proteico y la presencia de compuestos fenólicos y otros metabolitos bioactivos sustentan el **potencial nutracéutico de *J. neotropica***. Esta composición abre posibilidades para el desarrollo de ingredientes funcionales, aceites estabilizados, formulaciones alimentarias y otros productos de mayor valor agregado.

No obstante, la evidencia disponible se concentra principalmente en **caracterización química, análisis nutricional y ensayos *in vitro***. Para avanzar desde el potencial nutracéutico hacia productos funcionales científicamente validados se requieren estudios adicionales sobre biodisponibilidad, estabilidad de los compuestos durante el

procesamiento y almacenamiento, inocuidad, dosis y efectos biológicos *in vivo*. Esta necesidad de escalamiento tecnológico es ratificada por Ortega (2021), quien mediante un enfoque etnofarmacológico destaca que la validación de la estabilidad de los extractos de *J. neotropica* constituye el paso crítico para viabilizar su incorporación formal como materia prima en las industrias fitofarmacéutica y cosmética. El paso de las prácticas tradicionales a aplicaciones industriales reguladas exige, por tanto, estandarizar los procesos de extracción para garantizar la seguridad y eficacia de los bioproductos. En consecuencia, resulta más apropiado hablar actualmente de potencial nutracéutico que atribuir a la especie propiedades preventivas o terapéuticas plenamente demostradas.

11.2.7 Usos medicinales

Los usos medicinales de *J. neotropica* forman parte del conocimiento tradicional desarrollado por comunidades andinas y, más recientemente, han comenzado a ser evaluados mediante estudios fitoquímicos y farmacológicos experimentales. Hojas, corteza, frutos y otras estructuras de la especie han sido empleadas en preparaciones tradicionales y constituyen, además, materias primas para la obtención de extractos cuya actividad biológica ha sido evaluada bajo condiciones de laboratorio.

Desde una perspectiva etnobotánica, se ha documentado en comunidades andinas de Ecuador y Perú el empleo de hojas, corteza y frutos de *J. neotropica* en preparaciones destinadas tradicionalmente al tratamiento de inflamaciones, afecciones respiratorias y trastornos digestivos, así como en prácticas relacionadas con estados localmente descritos como “debilidad de la sangre”. Entre estas preparaciones se encuentran infusiones de hojas en agua o leche utilizadas como tónicos y en prácticas tradicionales asociadas con la anemia (Bussmann & Sharon, 2006; De la Torre et al., 2008). Estos usos forman parte del conocimiento etnobotánico asociado a la especie, pero su registro tradicional debe diferenciarse de la demostración experimental de eficacia terapéutica.

Los estudios farmacológicos disponibles proporcionan algunos antecedentes para contrastar estos usos tradicionales. En Perú, Gutiérrez (2011) evaluó un extracto etanólico de hojas de *J. neotropica* en modelos animales y reportó **actividad antidiarreica experimental**, relacionada en la investigación con la presencia de flavonoides, taninos y otros compuestos fenólicos. Al tratarse de evidencia preclínica, estos resultados no permiten establecer directamente eficacia, dosificación o seguridad terapéutica en seres humanos.

11.2.7.1 Actividad antifúngica

La actividad antifúngica de *J. neotropica* ha sido evaluada particularmente frente a *Candida albicans*, microorganismo oportunista asociado, entre otras afecciones, con infecciones de la cavidad oral. Tesoro Bardales Chuquilín & Ureta Lumbe (2017) evaluaron *in vitro* infusiones acuosas de corteza en concentraciones de 10, 20 y 30 %, utilizando clorhexidina al 0,12 % como tratamiento comparativo.

La respuesta observada varió según la concentración y el tiempo de exposición. La infusión al **30 % mostró inhibición desde los 10 minutos hasta las 8 horas**, mientras que las concentraciones de 20 y 10 % presentaron actividad a partir de los 20 minutos y

una hora, respectivamente. No obstante, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$). Por tanto, los resultados evidencian **actividad antifúngica bajo las condiciones específicas del ensayo**, pero requieren estudios adicionales antes de establecer conclusiones sobre su eficacia para aplicaciones clínicas.

11.2.7.2 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante constituye una de las propiedades bioactivas estudiadas en extractos de *J. neotropica*, principalmente a partir de hojas. Los ensayos realizados mediante captación del radical DPPH han mostrado una elevada actividad antioxidante asociada con la presencia de compuestos fenólicos, particularmente taninos y flavonoides (Aranda-Ventura et al., 2016; Hurtado Manrique et al., 2015).

Debido a que los valores experimentales de inhibición, IC_{50} y capacidad antioxidante fueron presentados previamente en los apartados **11.2.3 Extractos** y **11.2.6 Potencial nutracéutico**, no considero necesario repetirlos aquí. En el contexto medicinal, lo relevante es señalar que estos resultados constituyen evidencia de **actividad antioxidante *in vitro*** y no una demostración directa de efectos terapéuticos en seres humanos.

11.2.7.3 Actividad antimicrobiana y antibacteriana

Las investigaciones realizadas específicamente con *J. neotropica* muestran que la respuesta antimicrobiana depende del órgano vegetal, del tipo de extracto o producto obtenido, de su concentración y del microorganismo evaluado.

En Ecuador, Moyón (2020) evaluó extractos alcohólicos obtenidos de flores masculinas, corteza, hojas y frutos de *J. neotropica*. Los resultados mostraron diferencias en la actividad antibacteriana según el órgano vegetal y el microorganismo considerado, destacándose determinadas respuestas de los extractos de flores masculinas y corteza frente a *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*. Estos resultados, analizados desde la perspectiva fitoquímica en el apartado 11.2.3, muestran que la selección de la estructura vegetal constituye un factor relevante para la bioactividad de los extractos.

Otro enfoque ha considerado los compuestos volátiles de la especie. Ruiz Quiroz & Salazar Salvatierra (2021) caracterizaron mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas el aceite esencial de *J. neotropica* e identificaron 36 compuestos, entre los cuales predominaron α-pineno (39,88 %), cariofileno (27,66 %) y β-pineno (11,00 %). Sin embargo, el aceite esencial no mostró actividad antibacteriana significativa frente a *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis* y *Pseudomonas aeruginosa*. Este resultado es particularmente relevante porque demuestra que la presencia y diversidad de compuestos químicos no implican necesariamente actividad antibacteriana frente a todos los microorganismos evaluados.

Más recientemente, Benítez Cuenca & Villena Morante (2024) evaluaron extractos hidroalcohólicos de *J. neotropica*, tanto individualmente como en combinación con *Centaurium erythraea* y *Bougainvillea glabra*. El extracto de nogal presentó mayor

actividad frente a *Pseudomonas aeruginosa* que los otros extractos individuales evaluados, mientras que determinadas mezclas con mayor proporción de *J. neotropica* alcanzaron halos de inhibición de hasta **9,75 mm**. Debido a que estas últimas formulaciones combinaron diferentes especies vegetales, su respuesta debe interpretarse como resultado de la mezcla evaluada y no atribuirse exclusivamente al nogal.

En conjunto, la evidencia disponible muestra que *J. neotropica* posee una **tradición de uso medicinal acompañada por una base experimental creciente sobre determinadas actividades biológicas**, particularmente antifúngicas, antioxidantes y antibacterianas. Sin embargo, los resultados disponibles proceden principalmente de ensayos *in vitro* y estudios preclínicos y muestran variaciones relacionadas con el órgano vegetal, el método de extracción, la concentración y el modelo experimental. En consecuencia, estos antecedentes sustentan el interés farmacológico de la especie y justifican nuevas investigaciones, pero todavía **no permiten establecer indicaciones terapéuticas, dosis ni seguridad de uso en seres humanos**.

11.2.8 Aprovechamiento de residuos para la obtención de biocarbón

El aprovechamiento integral de *J. neotropica* comprende también la valorización de los residuos generados a partir de sus frutos. Estos materiales lignocelulósicos pueden constituir materias primas para la obtención de productos de mayor transformación, entre ellos el **biocarbón**, cuya estructura porosa y características superficiales permiten explorar aplicaciones como material adsorbente para la remoción de contaminantes en medios acuosos.

Cuenca Pérez (2024) evaluó residuos de *J. neotropica* y aguacate (*Persea americana*) como materias primas para la producción de **biocarbón magnético impregnado con nanopartículas de hierro**, mediante procesos de impregnación y pirólisis. La modificación con hierro estuvo orientada a mejorar las propiedades del material para la adsorción de mercurio presente en soluciones acuosas.

Los ensayos experimentales mostraron una elevada capacidad de remoción del contaminante. El biocarbón obtenido a partir de residuos de *J. neotropica* e impregnado con nanopartículas de hierro alcanzó una **eficiencia máxima de remoción de mercurio de 99,993 %**, bajo una concentración inicial de 10 ppm y un tiempo de adsorción de 120 minutos (Cuenca Pérez, 2024). El resultado evidencia el potencial de los residuos del fruto como materia prima para la obtención de materiales adsorbentes de alto desempeño.

No obstante, esta eficiencia corresponde a las **condiciones controladas del ensayo experimental** y no debe extrapolarse directamente a sistemas naturales o procesos de tratamiento a escala operacional. El comportamiento del adsorbente en condiciones reales puede estar influenciado por factores como la concentración del contaminante, el pH, la composición química del agua, la presencia simultánea de otros iones y las condiciones propias del proceso de adsorción.

Desde una perspectiva de aprovechamiento integral, la transformación de residuos de *J. neotropica* en biocarbón representa una alternativa para **convertir un subproducto del procesamiento del fruto en un material funcional de mayor valor agregado**. Esta

aplicación vincula el aprovechamiento de PFNM con principios de valorización de residuos y economía circular y abre una línea de investigación orientada al desarrollo de materiales de origen biológico para remediación ambiental. Sin embargo, su eventual aplicación requiere profundizar en aspectos como la regeneración y reutilización del adsorbente, la disposición segura del mercurio retenido, los costos de producción y su desempeño en matrices acuosas reales.

11.3 Servicios ecosistémicos

Además de los productos madereros y no madereros descritos en los apartados anteriores, *J. neotropica* participa en procesos ecológicos y genera beneficios que trascienden su aprovechamiento directo. Su presencia en bosques naturales, plantaciones, sistemas agroforestales, linderos, espacios urbanos y otros paisajes intervenidos permite reconocer aportes relacionados con la provisión de bienes, la regulación climática y microclimática, el almacenamiento de carbono, el mantenimiento de la biodiversidad, el reciclaje de nutrientes y los valores culturales asociados a la especie.

La diversidad de contextos en los que se encuentra el nogal andino resulta particularmente relevante para el análisis de estos servicios. En Ecuador, investigaciones desarrolladas en plantaciones puras, sistemas agroforestales, arbolado urbano, linderos y remanentes naturales han generado evidencia sobre diferentes funciones ecológicas y beneficios asociados a *J. neotropica*. Estos estudios permiten avanzar desde una descripción general de sus funciones hacia una **caracterización sustentada en información obtenida en condiciones locales**, complementada, cuando corresponde, con investigaciones realizadas en otros países andinos.

Diferencia conceptual entre servicios ecosistémicos y servicios ambientales

Aunque los términos **servicios ecosistémicos** y **servicios ambientales** se utilizan con frecuencia como equivalentes, conviene diferenciarlos conceptualmente. Los servicios ecosistémicos comprenden los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas y constituyen un marco ampliamente utilizado para analizar las relaciones entre procesos ecológicos y bienestar humano. Tradicionalmente se reconocen cuatro grandes categorías: **servicios de provisión, regulación, soporte y culturales** (Costanza et al., 1997; Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Los servicios ambientales, por su parte, se emplean con mayor frecuencia en contextos de gestión, política pública y valoración económica, particularmente cuando determinados beneficios ambientales pueden ser objeto de mecanismos de incentivo, compensación o pago, como ocurre con el almacenamiento de carbono, la protección de cuencas o la conservación de la biodiversidad (Farley & Costanza, 2010; Wunder, 2005).

En este capítulo se adopta el término **servicios ecosistémicos**, por su alcance integrador y porque permite analizar conjuntamente los beneficios materiales, las funciones ecológicas y los valores socioculturales relacionados con *J. neotropica*. Para efectos de organización, estos se examinan en las cuatro categorías señaladas, reconociendo que existen interacciones entre ellas y que un mismo proceso ecológico puede contribuir simultáneamente a varios beneficios.

11.3.1 Servicios de provisión

Los servicios de provisión corresponden a los **bienes materiales obtenidos de los ecosistemas**. En *J. neotropica*, estos se expresan principalmente mediante la madera, las semillas comestibles y otros productos forestales no madereros derivados de diferentes estructuras de la planta.

La madera constituye uno de los productos históricamente más valorados de la especie y encuentra aplicaciones en ebanistería, carpintería, artesanías y otros usos especializados. A ella se suman los productos forestales no madereros obtenidos principalmente del fruto, semillas, hojas, corteza y otros órganos, que han sido utilizados como alimentos, tintes y materias primas para aceites, extractos y diferentes productos transformados.

La caracterización tecnológica de la madera y sus usos se desarrolla en el apartado **11.1**, mientras que los PFNM —incluidos tintes, aceites, extractos, gel, productos alimenticios, potencial nutracéutico, usos medicinales y aprovechamiento de residuos— se analizan en el apartado **11.2**. Por esta razón, estos productos no se describen nuevamente aquí; su consideración como servicios de provisión permite, más bien, **integrar su aprovechamiento material dentro del conjunto de beneficios ecosistémicos asociados a la especie**.

Además de estos bienes obtenidos directamente del árbol, *J. neotropica* puede participar indirectamente en otros procesos productivos. Un caso de particular interés es su aporte de polen como recurso para insectos, aspecto que establece una relación entre la presencia del nogal y los sistemas apícolas de los Andes.

11.3.1.1 Aporte como recurso polinífero para la apicultura

J. neotropica es una especie predominantemente **anemófila**, cuya polinización depende principalmente del transporte del polen por el viento. Esta condición no excluye, sin embargo, la visita de insectos a sus flores masculinas para recolectar polen. En consecuencia, más que considerar al nogal como una especie melífera o dependiente de polinizadores, resulta más preciso reconocerlo como un **recurso polinífero complementario** para determinados insectos y, potencialmente, para sistemas apícolas establecidos en paisajes donde la especie está presente.

La evidencia más específica disponible procede de los Andes peruanos. Sayas Rivera y Huamán Mesía (2009) mediante análisis palinológicos realizados en el valle de Oxapampa, identificaron polen de *J. neotropica* en las cargas recolectadas por *Apis mellifera*. La especie representó un promedio del 10,65 % del aporte polínico global en el valle —con registros de hasta 15,2 % en áreas específicas como el distrito de Chontabamba—, ubicándose entre los tres taxones con mayor frecuencia relativa en las muestras analizadas, junto con *Dictyocaryum lamarckianum* y *Cyrtocymura scorpioides*. Este resultado demuestra que, bajo las condiciones ecológicas de los valles de montaña, el nogal constituye una fuente efectiva y abundante de proteína utilizada por las abejas

En Colombia también se ha registrado entomofauna asociada a *J. neotropica*, incluida *Apis mellifera* (Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y Universidad de los Andes, 2020). Asimismo, estudios integrales sobre la diversidad de abejas nativas en Ecuador destacan la amplia participación de especies del género *Bombus* en las redes de interacciones de los bosques montanos (Padrón y Rasmussen, 2025), donde recursos anemófilos masivos pueden actuar como un soporte nutricional alternativo en temporadas de escasez floral.

En términos funcionales, la disponibilidad de polen de *J. neotropica* complementa la oferta ambiental en paisajes andinos donde el nogal forma parte de sistemas agroforestales, linderos, plantaciones o remanentes de vegetación. Sin embargo, la evidencia actualmente disponible no permite cuantificar su contribución neta a la productividad de las colmenas ni establecer su peso relativo frente a la flora nativa acompañante. Por ello, su rol ecológico debe interpretarse como el de un recurso polinífero de soporte, cuya relevancia real dependerá directamente de la densidad local de árboles, su sincronía fenológica y la heterogeneidad florística del paisaje.

11.3.2 Servicios de regulación

Los servicios de regulación comprenden los procesos mediante los cuales los ecosistemas contribuyen a moderar las condiciones ambientales y mantener funciones ecológicas relevantes. En el caso de *J. neotropica*, la evidencia disponible en Ecuador se concentra principalmente en su participación en la **captura y almacenamiento de carbono, regulación microclimática, provisión de sombra y mantenimiento de condiciones asociadas con la biodiversidad**, tanto en sistemas forestales como agroforestales y urbanos.

La magnitud de estos servicios depende del contexto en el que se desarrolla la especie. La edad y dimensiones de los árboles, densidad y estructura del rodal, composición de especies, condiciones del suelo y manejo modifican las funciones observadas. En consecuencia, los resultados obtenidos en plantaciones, sistemas agroforestales, bosques naturales, linderos y arbolado urbano deben interpretarse dentro de las condiciones particulares de cada sistema y no como valores constantes atribuibles a la especie.

11.3.2.1 Captura y almacenamiento de carbono

La captura y el almacenamiento de carbono constituyen uno de los servicios de regulación mejor documentados para *J. neotropica* en Ecuador. A escala global, este servicio ambiental ha sido reconocido como uno de los beneficios mejor valorados pero menos explotados de los sistemas de uso de la tierra, donde la combinación de especies arbóreas leñosas con cultivos agrícolas potencia significativamente la resiliencia climática y la capacidad de secuestro de biomasa en comparación con los monocultivos tradicionales (Montagnini & Nair, 2004). Las investigaciones disponibles abarcan plantaciones puras, sistemas agroforestales, bosques naturales y arbolado urbano, y muestran que la magnitud del carbono acumulado depende de la edad y dimensiones de los árboles, la densidad del sistema, el manejo, las especies asociadas y, de manera especial, del **reservorio considerado en cada evaluación**. Por esta razón, los valores

correspondientes a biomasa aérea, detritus, necromasa, suelo o carbono total del sistema deben interpretarse separadamente y no compararse como magnitudes equivalentes.

Este criterio es consistente con la metodología desarrollada para la **Evaluación Nacional Forestal (ENF) del Ecuador**, que diferencia los principales depósitos de carbono forestal en biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, hojarasca y materia orgánica del suelo. Esta diferenciación metodológica resulta fundamental para evitar comparaciones directas entre estimaciones obtenidas a partir de reservorios distintos y constituye un referente metodológico nacional para la cuantificación del carbono en ecosistemas forestales (Aguirre et al., 2010).

Carbono almacenado en biomasa aérea y sistemas agroforestales

En los Andes del norte del Ecuador, las investigaciones realizadas en sistemas productivos con *J. neotropica* evidencian una contribución importante de la biomasa arbórea al almacenamiento de carbono. En un sistema agroforestal de Pimampiro, donde el nogal de aproximadamente 18 años se encontraba establecido en linderos asociados con granadilla (*Passiflora ligularis*), se estimó un almacenamiento promedio de **0,17 Mg C por árbol** y aproximadamente **19,99 Mg C ha^{-1}** para el componente arbóreo, con una densidad cercana a 120 árboles/ha (Añazco-Romero & Fernández-Gómez, 2021). El estudio estimó el carbono a partir de la biomasa aérea y una fracción de carbono de 0,5, por lo que este valor representa fundamentalmente el carbono contenido en la biomasa vegetal y no el carbono total del sistema incluyendo suelo.

Los mismos autores señalaron que la cantidad almacenada por individuo estuvo asociada con características como edad, volumen, densidad de la madera y condiciones de crecimiento. En el caso de *J. neotropica*, los árboles evaluados presentaron aproximadamente 18 años de edad y una densidad de madera de 527 kg/m^3; sin embargo, los resultados muestran que ninguna de estas variables explica por sí sola la magnitud del carbono almacenado, debido a la interacción entre factores silvícolas y ambientales.

En otra investigación realizada también en Pimampiro se compararon una plantación pura de *J. neotropica* y una plantación asociada con café (*C. arabica*). Considerando el carbono de la biomasa forestal y del detritus superficial, Ramírez et al. (2019) estimaron **13,17 Mg C ha^{-1}** en la plantación pura y **16,11 Mg C ha^{-1}** en el sistema asociado. En ambos sistemas, el componente forestal representó la mayor parte del carbono evaluado: 13,08 Mg C ha^{-1} en la plantación pura y 15,53 Mg C ha^{-1} en el sistema con café; el detritus aportó 0,09 y 0,58 Mg C ha^{-1}, respectivamente.

La mayor cantidad registrada en el sistema asociado evidencia una diferencia entre las dos configuraciones evaluadas, aunque debe evitarse atribuirla exclusivamente al café. La estructura del sistema, el manejo, las condiciones edáficas y el desarrollo individual de los árboles pueden intervenir simultáneamente en la producción de biomasa. En consecuencia, estos resultados permiten afirmar que el sistema nogal–café presentó mayor almacenamiento de carbono en biomasa forestal y detritus que la plantación pura bajo las condiciones específicas del estudio, pero no establecer una relación causal generalizable a todos los sistemas agroforestales.

Carbono almacenado en el suelo y carbono total del sistema

La inclusión del carbono orgánico del suelo modifica sustancialmente la magnitud del almacenamiento estimado. La tesis de Oyos (2019), correspondiente a las mismas plantaciones evaluadas posteriormente por Ramírez et al. (2019), incorporó adicionalmente el carbono del suelo hasta la profundidad considerada en el estudio y estimó **262,49 Mg C ha^{-1}** para la plantación asociada con café y **124,01 Mg C ha^{-1}** para la plantación pura.

La diferencia respecto de los valores de 16,11 y 13,17 Mg C ha^{-1} no constituye una inconsistencia entre ambas publicaciones, sino que responde a los **reservorios incluidos en cada cálculo**. En la estimación integral de Oyos (2019), el suelo aportó **246,13 Mg C ha^{-1}** en el sistema con café y **110,84 Mg C ha^{-1}** en la plantación pura, frente a 14,71 y 13,08 Mg C ha^{-1} almacenados en la biomasa del nogal.

Estos resultados muestran que, bajo las condiciones del estudio, **el suelo constituyó el principal reservorio de carbono**, representando aproximadamente el 94 % del carbono total del sistema asociado y alrededor del 89 % en la plantación pura. Esta diferencia destaca la importancia de especificar qué componentes fueron incluidos en cada investigación: las estimaciones de carbono total del sistema no deben compararse directamente con aquellas restringidas a biomasa aérea o detritus.

Asimismo, aunque la plantación asociada presentó una mayor cantidad de carbono orgánico del suelo, este reservorio responde a procesos acumulativos vinculados con el uso previo del terreno, la incorporación y descomposición de materia orgánica, las propiedades edáficas, la cobertura vegetal y el manejo. Por ello, las diferencias observadas no pueden atribuirse exclusivamente a la presencia de ***J. neotropica*** o del cultivo asociado.

Carbono almacenado en bosque mixto de nogal

En el sur del Ecuador, Aguirre et al. (2019) evaluaron el carbono acumulado en diferentes ecosistemas del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, en La Argelia, Loja. En el bosque de nogal, caracterizado como una formación mixta en la que se registraron 43 especies, estimaron un almacenamiento de 95,66 Mg C ha^{-1}**.** Para esta evaluación se establecieron cinco parcelas de 400 m² y se consideraron diferentes componentes de la biomasa vegetal y la necromasa, aplicando una fracción de carbono de 0,5. El valor obtenido corresponde, por tanto, al carbono acumulado en el ecosistema estudiado y no exclusivamente a la biomasa de *J. neotropica*.

Este antecedente amplía hacia el sur del Ecuador la evidencia disponible sobre el almacenamiento de carbono en ecosistemas donde *J. neotropica* constituye un componente forestal relevante. Sin embargo, debido a las diferencias en los compartimentos considerados y en los procedimientos de estimación, los 95,66 Mg C ha^{-1} no deben compararse directamente con los valores obtenidos exclusivamente para la biomasa arbórea de plantaciones, linderos o sistemas agroforestales, ni con estimaciones de carbono total que incorporan el carbono orgánico del suelo.

Carbono en necromasa de bosque natural

En los bosques naturales, otro reservorio relevante corresponde a la necromasa. En la Reserva Natural El Tundo, cantón Sozoranga, provincia de Loja, Quezada (2023) y posteriormente Quezada y Palacios (2024) evaluaron el carbono almacenado en material vegetal muerto asociado con un bosque donde *J. neotropica* constituye un componente estructural importante. El estudio estimó aproximadamente **33,94 Mg ha^{-1} de necromasa seca**, equivalentes a **16,97 Mg C ha^{-1}**, utilizando una fracción de carbono cercana a 0,5.

Este valor debe interpretarse específicamente como **carbono almacenado en necromasa** y no como carbono total del bosque ni como carbono contenido en la biomasa viva de la especie. En consecuencia, no es directamente comparable con los valores reportados para la biomasa arbórea de plantaciones o sistemas agroforestales. Para efectos de esta síntesis se conserva el valor final reportado de 16,97 Mg C ha^{-1}, correspondiente exclusivamente al reservorio de necromasa.

Carbono en arbolado urbano

El almacenamiento de carbono asociado a *J. neotropica* también ha sido cuantificado en espacios urbanos. En la ciudad de Loja, Merino (2024) registró diez individuos de la especie que acumularon en conjunto **5,94 Mg de biomasa y 2,79 Mg de carbono**. Esto equivale a un promedio aproximado de **0,279 Mg C por árbol** dentro del conjunto evaluado, aunque este valor debe interpretarse únicamente como una media descriptiva de esos individuos y no como una tasa general de almacenamiento de la especie.

El inventario urbano completo comprendió 5 259 individuos y almacenó 1 963,49 Mg de carbono; sin embargo, este valor corresponde al conjunto de árboles, arbustos y palmas de la ciudad y no debe atribuirse al nogal. El aporte de *J. neotropica* dentro de este sistema evidencia que los árboles establecidos en espacios urbanos pueden constituir reservorios de carbono a escala individual, complementando otros servicios asociados al arbolado urbano.

En Yuyucocha, Ibarra, Chagna et al. (2018), evaluaron igualmente el carbono del componente forestal de un predio con plantaciones y sistemas agroforestales. El inventario comprendió **666 árboles de 22 especies**, entre ellos 50 individuos de nogal. El almacenamiento total del componente forestal alcanzó **35,38 Mg C ha^{-1}**, de los cuales 15,42 Mg C ha^{-1} correspondieron al conjunto de especies nativas y 19,96–19,98 Mg C ha^{-1} a especies introducidas. Dentro del grupo de especies nativas, el nogal presentó el mayor contenido de carbono; sin embargo, el valor de 35,38 Mg C ha^{-1} **c**orresponde al conjunto del componente forestal evaluado y no exclusivamente a *J. neotropica*.

Dinámica de acumulación anual basada en anillos de crecimiento

La mayor parte de las estimaciones analizadas en este apartado corresponden a aproximaciones estáticas del carbono total acumulado en reservorios específicos; sin embargo, la comprensión integral de este servicio ecosistémico requiere evaluar la tasa o flujo de fijación anual de la especie. Al respecto, mediante el análisis dendrocronológico

de anillos de crecimiento al sur de Ecuador, Lozano et al. (2026) determinaron que *J. neotropica* presenta una tasa neta de acumulación de carbono que oscila entre 8 y 12 kg/año por individuo, superando marcadamente el rendimiento de otras especies asociadas a bosques secos como *Vachellia macracantha*.

La investigación evidenció además dos patrones clave para la modelación ambiental: en primer lugar, los árboles no acumulan carbono de manera lineal, sino que muestran tendencias fluctuantes donde períodos de alto incremento radial alternan con fases de baja fijación. En segundo lugar, las tasas de fijación demostraron una estrecha dependencia del sitio, registrándose variaciones estadísticas significativas entre las poblaciones de la Reserva Natural El Tundo frente a ecosistemas como los Shucos o el Parque Universitario Francisco Vivar Castro (PUFVC). Estos resultados demuestran que el secuestro anual de carbono por el nogal andino es un proceso biológico dinámico, regulado críticamente por las condiciones microambientales de cada localidad forestal.

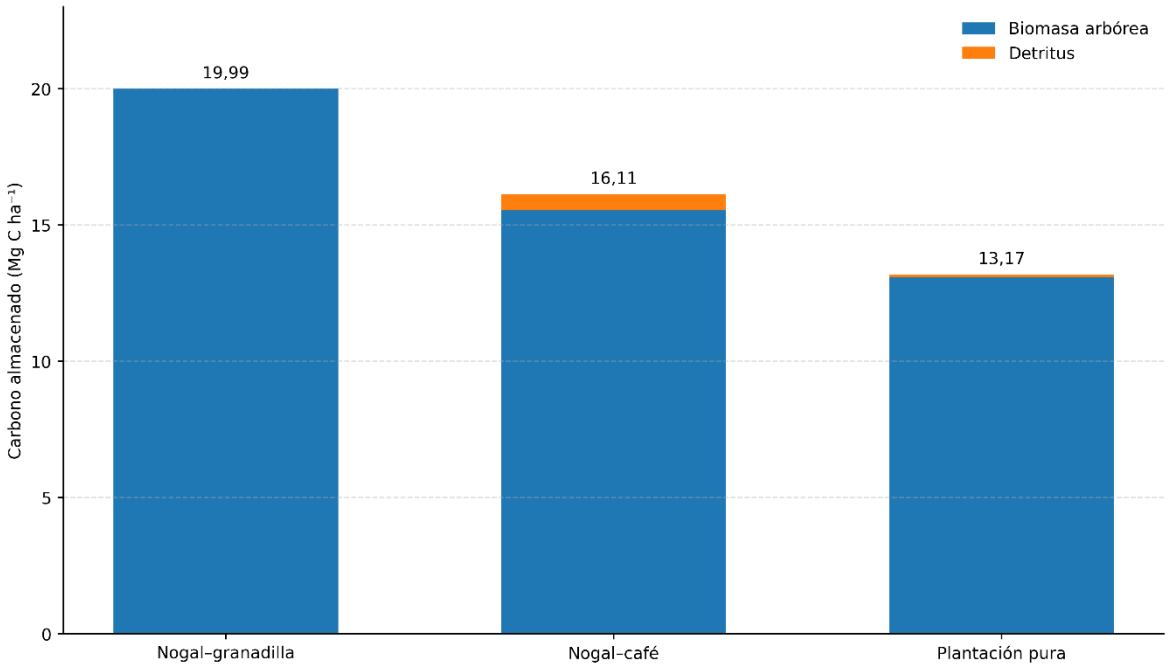
En conjunto, las investigaciones realizadas en Ecuador muestran que *J. neotropica* participa en el almacenamiento de carbono en **plantaciones, sistemas agroforestales, bosques naturales y arbolado urbano**, aunque las magnitudes registradas dependen tanto de las características estructurales del sistema como del reservorio y la escala considerados en cada investigación.

La evidencia disponible comprende diferentes reservorios de carbono —principalmente **biomasa aérea, detritus, necromasa y carbono orgánico del suelo**— evaluados en distintas escalas y sistemas de uso del territorio. Esta diferenciación resulta fundamental para evitar comparaciones metodológicamente incorrectas. Los 19,99 Mg C ha^{-1} estimados en el sistema nogal–granadilla corresponden fundamentalmente a biomasa aérea; los 16,11 y 13,17 Mg C ha^{-1} de nogal–café y plantación pura incluyen biomasa forestal y detritus; los 262,49 y 124,01 Mg C ha^{-1} incorporan además el carbono del suelo; mientras que los 16,97 Mg C ha^{-1} registrados en El Tundo corresponden exclusivamente a necromasa.

Las estimaciones realizadas en sistemas productivos del norte del Ecuador muestran diferencias en el carbono almacenado principalmente en el componente arbóreo de *J. neotropica*. Los mayores valores se registraron en el sistema nogal–granadilla, seguido por el sistema nogal–café y la plantación pura. No obstante, las estimaciones difieren parcialmente en los componentes considerados, por lo que su comparación debe interpretarse dentro del alcance metodológico de cada investigación (Figura 11.11).

Figura 11.11

Carbono almacenado en el componente arbóreo y detritus en sistemas productivos con Juglans neotropica del norte del Ecuador



Nota. El sistema nogal–granadilla presentó aproximadamente 19,99 Mg C ha^{-1} en biomasa aérea (Añazco-Romero y Fernández-Gómez, 2021). En el sistema nogal–café se registraron 15,53 Mg C ha^{-1} en biomasa forestal y 0,58 Mg C ha^{-1} en detritus, con un total de 16,11 Mg C ha^{-1}; en la plantación pura se registraron 13,08 Mg C ha^{-1} en biomasa forestal y 0,09 Mg C ha^{-1} en detritus, con un total de 13,17 Mg C ha^{-1} (Ramírez et al., 2019). Los valores representan los componentes evaluados en cada investigación y no incluyen carbono orgánico del suelo.

La evidencia disponible permite concluir que *J. neotropica* contribuye al almacenamiento de carbono bajo diferentes configuraciones de uso del territorio; sin embargo, la magnitud de este servicio debe expresarse siempre en función del sistema, la escala de análisis y los reservorios cuantificados. Por tanto, **no resulta científicamente apropiado establecer una clasificación simple de qué ecosistema o sistema productivo almacena más carbono a partir de los valores actualmente disponibles**, debido a las diferencias metodológicas entre las investigaciones.

Para futuras evaluaciones comparativas será necesario aplicar protocolos que consideren reservorios equivalentes —biomasa aérea y subterránea, madera muerta, hojarasca y carbono orgánico del suelo a profundidades estandarizadas— y utilizar unidades y métodos homogéneos, en concordancia con los criterios establecidos para la Evaluación Nacional Forestal del Ecuador. Esto permitirá estimar con mayor precisión la contribución relativa de *J. neotropica* a la regulación climática y comparar su desempeño entre bosques naturales, plantaciones, sistemas agroforestales y ambientes urbanos.

11.3.2.2 Regulación microclimática

J. neotropica, como especie arbórea dominante y estructurante en los sistemas evaluados, puede desempeñar un papel importante en la regulación de las condiciones microclimáticas mediante la cobertura del dosel, el sombreado y la modificación de variables como la temperatura y la humedad relativa. Investigaciones desarrolladas en Imbabura han evaluado estas relaciones en plantaciones puras, árboles en lindero y diferentes prácticas agroforestales dominadas por nogal, comparando las condiciones registradas bajo su cobertura con espacios externos y entre distintas configuraciones de establecimiento.

En Natabuela, Gonzalon (2024) realizó durante seis meses un seguimiento de las condiciones microclimáticas en una plantación pura de *J. neotropica*, mientras que en Bellavista evaluó árboles establecidos en linderos. El estudio consideró temperatura, humedad relativa y precipitación, con registros efectuados dentro y fuera de los sistemas, lo que permitió analizar las diferencias microclimáticas asociadas con la cobertura arbórea del nogal.

Las diferencias térmicas fueron particularmente evidentes en la plantación pura de Natabuela. Durante la mañana se registraron temperaturas de aproximadamente 12–15 °C dentro de la plantación, mientras que fuera alcanzaron alrededor de 20 °C. Al mediodía, las temperaturas externas llegaron hasta 36 °C, considerablemente superiores a las observadas bajo la cobertura arbórea; durante la tarde también se registraron diferencias del orden de 4–6 °C entre el interior y el exterior. Gonzalon (2024) contrastó estos resultados con los obtenidos previamente por Simbaña (2023), quien registró temperaturas medias de 19,87 °C dentro y 24,20 °C fuera de una plantación pura de *J. neotropica*. Estos resultados muestran temperaturas menores bajo la cobertura del nogal respecto de los espacios externos evaluados, particularmente durante los periodos de mayor calentamiento diario.

Un patrón semejante se observó en los árboles en lindero de Bellavista. Gonzalon (2024) registró dentro del sistema temperaturas medias de 13,87 °C durante la mañana y 21,92 °C al mediodía, mientras que fuera del sistema la temperatura media del mediodía alcanzó 29,65 °C. Estas diferencias entre las condiciones internas y externas documentan condiciones térmicas diferenciadas entre el interior y el exterior del sistema arbóreo dominado por J. neotropica.

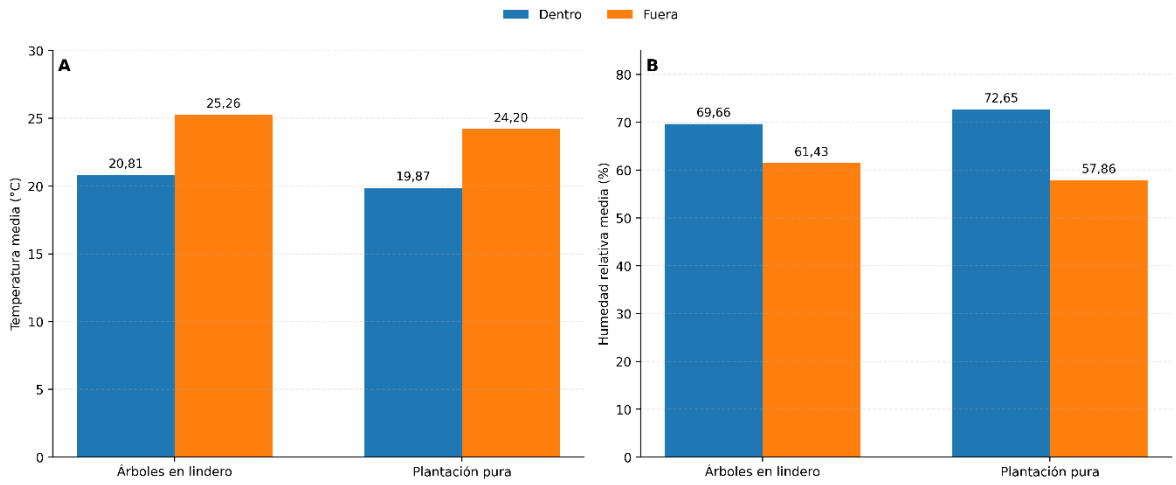
La humedad relativa mostró igualmente diferencias entre las áreas bajo cobertura y los espacios externos. Los registros realizados en Natabuela y Bellavista indican que bajo la vegetación se mantuvieron condiciones de mayor humedad relativa que en las áreas externas, comportamiento relacionado con el sombreado y la cobertura vegetal (Gonzalon, 2024). Estos resultados son consistentes con la investigación de Simbaña (2023), quien evaluó específicamente la temperatura y la humedad relativa en una plantación pura y árboles en lindero de J. neotropica. En conjunto, ambas investigaciones documentan menores temperaturas y mayores niveles de humedad relativa bajo la cobertura de los sistemas dominados por nogal en comparación con los espacios externos evaluados.

Esta función reguladora ha sido corroborada mediante monitoreo continuo en la plantación experimental de *J. neotropica* de Yuyucocha, Ibarra. Romero-Astudillo et al. (2026), a partir de más de 86 000 mediciones obtenidas durante 60 días, identificaron una estratificación vertical persistente de la humedad atmosférica, con valores sistemáticamente mayores debajo del dosel que sobre este y un gradiente relativo cercano al 36 %. Este patrón se mantuvo durante el día y la noche, mientras que la humedad del suelo presentó una dinámica temporal comparativamente más estable que la humedad atmosférica. Los resultados aportan evidencia de un efecto amortiguador asociado con la estructura del dosel, que favorece la retención localizada de humedad y atenúa las fluctuaciones atmosféricas de corto plazo bajo la cobertura de *J. neotropica*.

El efecto regulador de la cobertura arbórea se evidencia al comparar directamente las condiciones registradas dentro y fuera de los sistemas dominados por *J. neotropica*. Tanto en árboles establecidos en lindero como en plantación pura, el interior presentó **menores temperaturas medias y mayores niveles de humedad relativa** que los espacios externos, como se observa en la Figura 11.12.

Figura 11.12

Variación de la temperatura y humedad relativa dentro y fuera de sistemas dominados por Juglans neotropica en Imbabura



Nota. **A)** Temperatura media; <> humedad relativa media. Los valores corresponden a mediciones realizadas dentro y fuera de sistemas de árboles en lindero y plantación pura de *J. neotropica*. Adaptado de Simbaña (2023).

La investigación de Rivera (2026) amplió este análisis hacia diferentes configuraciones agroforestales dominadas por *J. neotropica*. El estudio evaluó cuatro prácticas —**agrosilvícola, silvopastoril, árboles dispersos y cortina rompeviento**— y encontró diferencias en su comportamiento microclimático. Las temperaturas se mantuvieron aproximadamente entre **15 y 20 °C** durante el periodo de evaluación; la práctica silvopastoril presentó, en general, las condiciones térmicas más bajas y estables, mientras que la cortina rompeviento alcanzó valores cercanos a 20 °C en varios meses.

La humedad relativa presentó una variación más amplia, aproximadamente entre **52 y 90 %**. Los árboles dispersos alcanzaron los valores más altos en varios meses, cercanos o superiores al 88 %, mientras que la cortina rompeviento presentó los registros más bajos durante julio y agosto, alrededor de 53 y 52 %, respectivamente. Estos resultados indican que, aun cuando *J. neotropica* constituye el componente arbóreo dominante y estructurante, la magnitud de su función reguladora varía de acuerdo con la **configuración espacial de los árboles, la densidad y continuidad de la cobertura y las características de cada práctica agroforestal**.

La precipitación constituye una variable complementaria para caracterizar las condiciones ambientales de los sitios estudiados. Gonzalon (2024) registró durante seis meses aproximadamente **455 mm en la plantación pura de Natabuela y 490 mm en el sistema de árboles en lindero de Bellavista**. Por su parte, Rivera (2026) registró acumulados de **715,9 mm en el sistema agrosilvícola, 815,3 mm en el silvopastoril, 684,1 mm en árboles dispersos y 872,12 mm en la cortina rompeviento**. Estas diferencias describen las condiciones pluviométricas ocurridas durante los respectivos periodos de evaluación, pero no deben interpretarse como un efecto directo de *J. neotropica*, debido a que la precipitación está determinada principalmente por procesos atmosféricos y por su variabilidad espacial y temporal.

En conjunto, las investigaciones desarrolladas en Imbabura documentan condiciones microclimáticas diferenciadas bajo sistemas dominados por *J. neotropica* respecto de los espacios externos evaluados y entre distintas configuraciones de establecimiento. Simbaña (2023) y Gonzalon (2024) registraron menores temperaturas y mayores niveles de humedad relativa bajo la cobertura arbórea; **Romero-Astudillo et al. (2026) demostraron, mediante monitoreo continuo, la persistencia de un gradiente vertical de humedad y un efecto amortiguador asociado con el dosel**; mientras que Rivera (2026) mostró que la magnitud de las condiciones microclimáticas varió entre prácticas agrosilvícolas, silvopastoriles, árboles dispersos y cortinas rompeviento. Estas comparaciones deben interpretarse dentro de las condiciones particulares de cada sitio y diseño de evaluación.

La evidencia disponible permite reconocer la participación de *J. neotropica* en la conformación de las condiciones microclimáticas de los sistemas estudiados, particularmente cuando constituye el componente arbóreo dominante. No obstante, las diferencias registradas no dependen exclusivamente de la especie: intervienen también la densidad y disposición espacial de los árboles, la vegetación asociada, las características del sitio, el manejo y las condiciones meteorológicas. Por ello, este servicio debe interpretarse como resultado de la estructura y funcionamiento del sistema en el que participa el nogal.

11.3.2.3 Regulación de la radiación y provisión de sombra en sistemas agroforestales

La regulación de la radiación solar constituye otro servicio ecosistémico asociado con la estructura arbórea de *J. neotropica*. La cobertura de sus copas intercepta parcialmente la radiación incidente y genera condiciones de sombra cuya magnitud varía según el desarrollo foliar, la densidad, la disposición espacial de los árboles y la estructura de los sistemas en los que se establece. En sistemas agroforestales, esta función adquiere especial importancia porque modifica la cantidad de energía que alcanza los estratos

inferiores y los cultivos asociados y se relaciona directamente con la regulación microclimática descrita en el apartado anterior.

La investigación de Rivera (2026) aporta evidencia sobre esta dinámica en cuatro prácticas agroforestales dominadas por *J. neotropica*: agrosilvícola, silvopastoril, árboles dispersos y cortina rompeviento. La luminosidad presentó una marcada variación entre septiembre, correspondiente al periodo de mayor desarrollo foliar, y enero, asociado con una menor cobertura foliar. En términos generales, la entrada de luz aumentó de **40,56 % en septiembre a 68,64 % en enero**, equivalente a una diferencia de 28,08 puntos porcentuales. Este comportamiento evidencia que la capacidad de regulación de la radiación en sistemas dominados por nogal presenta un **componente estacional estrechamente relacionado con la dinámica de su cobertura foliar**.

Las diferencias observadas también estuvieron asociadas con la configuración espacial de los árboles. En septiembre, la menor luminosidad se registró en la práctica silvopastoril de Cotacachi (**33,28 %**), seguida por los árboles dispersos de Yachay (**37,44 %**); en contraste, la cortina rompeviento de Yuyucocha alcanzó **49,92 %**, reflejando una mayor entrada de luz. En enero la luminosidad aumentó en todas las prácticas y alcanzó **74,88 % en el sistema silvopastoril, 70,72 % en la cortina rompeviento, 66,56 % en árboles dispersos y 62,40 % en el sistema agrosilvícola**.

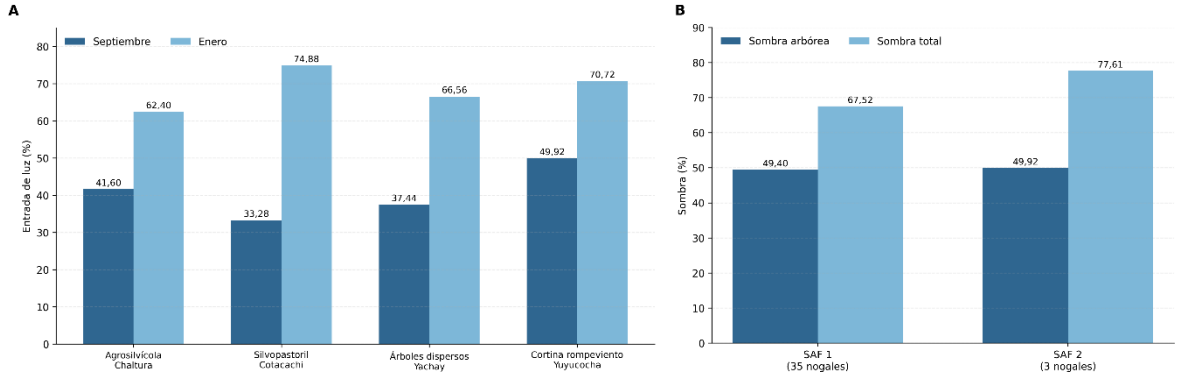
Estos resultados muestran que la regulación de la radiación responde a dos mecanismos complementarios. Por una parte, la **variación estacional de la cobertura foliar de *J. neotropica*** modifica la cantidad de luz que atraviesa el dosel; por otra, la **configuración espacial del componente arbóreo** determina cómo se distribuye esa radiación dentro del sistema. De este modo, arreglos lineales, árboles dispersos y coberturas más continuas pueden producir condiciones diferentes de luminosidad aun cuando el nogal constituya el componente arbóreo dominante.

La provisión de sombra también ha sido cuantificada en sistemas agroforestales con café de Cananvalle, Imbabura. Liquinchano Quiranza (2026) evaluó tres SAF mediante un censo del componente arbóreo y determinó el porcentaje de sombra utilizando un densiómetro esférico. Dos de estos sistemas incluyeron *J. neotropica*: en el **SAF 1 se registraron 35 individuos de nogal dentro de un total de 134 árboles**, mientras que en el SAF 2 se registraron tres individuos. En el SAF 1, por tanto, el nogal representó aproximadamente una cuarta parte del componente arbóreo y constituyó una de las especies leñosas más abundantes del sistema.

La regulación de la radiación presenta tanto una dimensión estacional como estructural. La variación de la entrada de luz entre periodos de diferente desarrollo foliar y los porcentajes de sombra registrados en sistemas agroforestales con presencia de nogal permiten visualizar estas dos expresiones complementarias del servicio de regulación (Figura 11.13).

Figura 11.13

Regulación de la radiación y provisión de sombra en sistemas agroforestales con Juglans neotropica en Imbabura



Nota. **A)** Entrada de luz (%) registrada en septiembre, periodo de mayor desarrollo foliar, y enero, periodo de menor cobertura foliar, en cuatro prácticas agroforestales asociadas con *J. neotropica*: agrosilvícola, silvopastoril, árboles dispersos y cortina rompeviento. Adaptado de Rivera (2026). **B)** Sombra generada por el componente arbóreo y sombra total del sistema —incluida la autosombra del café— en dos sistemas agroforestales de Cananvalle que contienen *J. neotropica*. El SAF 1 registró 35 individuos de nogal y el SAF 2, tres individuos. Adaptado de Liquinchano (2026).

La sombra producida por el componente arbóreo fue relativamente similar entre los tres sistemas evaluados: **49,40 % en el SAF 1, 49,92 % en el SAF 2 y 50,18 % en el SAF 3**. Estos porcentajes representan la cobertura generada conjuntamente por todas las especies arbóreas y no pueden atribuirse exclusivamente a *J. neotropica*. Sin embargo, la elevada abundancia relativa del nogal en el SAF 1 permite reconocer su participación relevante en la conformación estructural del dosel y, consecuentemente, en la provisión de sombra de ese sistema.

Esta distinción resulta particularmente importante cuando se incorpora la propia cobertura del cultivo. Liquinchano (2026) diferenció la **sombra generada por el componente arbóreo**, la **autosombra del café** y la **sombra total del sistema**. Al integrar la cobertura arbórea con la autosombra de *C. arabica*, los valores aumentaron a **67,52 % en el SAF 1, 77,61 % en el SAF 2 y 82,76 % en el SAF 3**. Esta diferenciación metodológica permite precisar que el servicio de regulación de la radiación aportado por los árboles constituye solo una parte de la sombra finalmente existente en el agroecosistema.

Los resultados de Cananvalle aportan además evidencia sobre la relación entre cobertura y microclima. La investigación encontró una **relación débil y negativa entre la sombra total y la temperatura**, con una ligera disminución de esta variable conforme aumentó la cobertura, mientras que la humedad relativa presentó una **correlación positiva fuerte con la sombra**, indicando una tendencia hacia condiciones ambientales más húmedas en los sistemas de mayor cobertura. Estos resultados refuerzan la relación funcional entre regulación de la radiación, provisión de sombra y regulación microclimática.

La evidencia procedente de Rivera (2026) y Liquinchano (2026) muestra, por tanto, dos dimensiones complementarias de este servicio. La primera corresponde a la **dinámica temporal de la radiación**, determinada por cambios en la cobertura foliar y expresada en diferencias de luminosidad entre periodos del año; la segunda corresponde a la **estructura espacial del dosel**, expresada mediante el porcentaje de sombra generado por el componente arbóreo dentro de los sistemas agroforestales.

En sistemas donde *J. neotropica* constituye el componente arbóreo dominante o posee una participación estructural importante, su arquitectura de copa y dinámica foliar contribuyen de manera relevante a definir las condiciones de radiación bajo el dosel. No obstante, en sistemas multiespecíficos la sombra finalmente recibida por los cultivos depende también de las especies leñosas acompañantes, de la densidad y distribución espacial de los árboles y de la propia arquitectura del cultivo asociado. Por ello, resulta más apropiado interpretar este servicio como una **función reguladora liderada por el componente arbóreo de nogal dentro de una estructura agroforestal compleja**, antes que atribuir la totalidad del sombreado exclusivamente a una sola especie.

En conjunto, las investigaciones realizadas en Imbabura permiten reconocer la **regulación de la radiación y provisión de sombra** como un servicio ecosistémico relevante de los sistemas agroforestales con *J. neotropica*. Su expresión presenta un carácter espacial y estacional: cambia según la configuración del sistema y a lo largo del ciclo foliar del nogal. Desde una perspectiva de manejo, esta función puede regularse mediante decisiones silviculturales relacionadas con la densidad, espaciamiento, disposición de los árboles y manejo de copa, buscando un equilibrio entre la **protección frente a radiación intensa y la disponibilidad de luz necesaria para los componentes productivos asociados**.

11.3.3 Servicios de soporte

Los servicios de soporte comprenden los procesos ecológicos que permiten mantener la estructura y funcionamiento de los ecosistemas y que, a su vez, sustentan la provisión de otros servicios ecosistémicos. En los sistemas donde *J. neotropica* constituye un componente arbóreo dominante o estructurante, estos servicios se expresan principalmente mediante la **provisión de hábitat para flora y fauna asociada, el mantenimiento de la biodiversidad, la incorporación de materia orgánica y el reciclaje de nutrientes**. A diferencia de los servicios de regulación analizados anteriormente —como el almacenamiento de carbono, la modulación microclimática y la regulación de la radiación—, los servicios de soporte actúan como procesos ecológicos de base que contribuyen a conservar la funcionalidad y estabilidad de los sistemas forestales y agroforestales.

11.3.3.1 Biodiversidad asociada y función de hábitat

J. neotropica participa en la conformación de hábitats dentro de bosques, plantaciones y sistemas agroforestales andinos, donde su estructura arbórea, cobertura de copa, hojarasca y permanencia en el paisaje generan condiciones utilizadas por diferentes grupos de flora y fauna. Esta función adquiere particular importancia en matrices agropecuarias, en las que árboles establecidos en linderos, arreglos agroforestales, sistemas silvopastoriles o como individuos dispersos incrementan la complejidad

estructural del paisaje y proporcionan sitios de refugio, alimentación, desplazamiento y establecimiento para otros organismos.

La importancia estructural de *J. neotropica* en los bosques naturales fue documentada en el bosque El Colorado, cantón Puyango, provincia de Loja. En una parcela permanente de una hectárea, establecida en un bosque semideciduo montano bajo, se registraron 1 421 individuos con diámetro a la altura del pecho igual o superior a 5 cm, correspondientes a 59 especies. Dentro de esta comunidad, *J. neotropica* presentó la mayor dominancia relativa (11,13 %), el segundo índice de valor de importancia más elevado (14,29 %) y los mayores valores de área basal (2,94 m^2/ha) y volumen (37,58 m^3/ha). Estos resultados muestran que el nogal puede constituir un componente estructural sobresaliente de los remanentes boscosos donde se conserva, contribuyendo a la conformación del dosel y a la complejidad física del hábitat; no obstante, los autores advirtieron que su valor comercial también podría incrementar la presión de aprovechamiento sobre estas poblaciones (León Suquilanda et al., 2006).

Las investigaciones realizadas en Imbabura constituyen la principal evidencia disponible para *J. neotropica* en plantaciones y sistemas agroforestales en Ecuador. Simbaña (2023) comparó una plantación pura con árboles establecidos en linderos y registró diferencias importantes en la flora y fauna asociadas. En la plantación se contabilizaron **665 individuos vegetales**, acompañados por **147 insectos y 109 aves**, mientras que en los linderos se registraron **251 plantas, 675 insectos y 158 aves**. En estos últimos estuvieron representados, entre otros, los órdenes de aves Passeriformes, Trochiliformes, Columbiformes y Falconiformes.

La comparación evidencia que una mayor cantidad de individuos vegetales no necesariamente implica una mayor presencia de fauna. La plantación pura presentó una vegetación numéricamente más abundante, mientras que los linderos mostraron una fauna considerablemente más numerosa, especialmente de insectos. Esta diferencia sugiere que la **heterogeneidad estructural y la conexión con otros componentes del paisaje** pueden ser tan importantes como la densidad vegetal para determinar la función de hábitat de los sistemas con nogal.

Gonzalon (2024) encontró nuevamente diferencias entre una plantación pura de Natabuela y árboles establecidos en linderos en Bellavista. El estudio registró variaciones en la composición de flora, insectos y aves entre ambos ambientes, confirmando que el tipo de configuración del nogal modifica las condiciones disponibles para la biodiversidad asociada. Estos resultados complementan los de Simbaña (2023) y muestran que las plantaciones y los linderos no constituyen hábitats equivalentes, aun cuando *J. neotropica* sea el componente arbóreo que estructura ambos sistemas.

La investigación de Rivera (2026) amplió este análisis a cuatro prácticas agroforestales con *J. neotropica*: agrosilvícola, árboles dispersos, silvopastoril y cortina rompeviento. La diversidad de flora, estimada mediante el índice de Shannon-Wiener, osciló entre **1,00 y 1,46**, registrándose el mayor valor en árboles dispersos (1,46), seguido por la cortina rompeviento (1,27), el sistema agrosilvícola (1,09) y el silvopastoril (1,00). Los valores del índice de Simpson oscilaron entre 0,42 y 0,64, con el valor más alto nuevamente en árboles dispersos.

La diversidad de insectos mostró diferencias menores entre configuraciones. Los valores de Shannon-Wiener variaron únicamente entre **0,99 y 1,01**, mientras que Simpson se mantuvo entre **0,60 y 0,61** en las cuatro prácticas. Este comportamiento indica que todas las configuraciones estudiadas proporcionaron condiciones para la presencia de insectos, aunque sin diferencias marcadas en los índices de diversidad utilizados.

La avifauna presentó un patrón más definido. Rivera (2026) obtuvo valores de Shannon-Wiener de **1,88 en el sistema agrosilvícola, 2,13 en árboles dispersos, 1,74 en el silvopastoril y 1,72 en la cortina rompeviento**. El índice de Simpson alcanzó valores elevados en las cuatro prácticas, entre 0,76 y 0,85, siendo nuevamente mayor en árboles dispersos. Entre las especies registradas se encontraron aves granívoras, frugívoras e insectívoras, entre ellas *Pheucticus chrysogaster*, *Spinus spinescens*, *Spinus magellanicus*, *Zonotrichia capensis* y otras especies asociadas a ambientes agroforestales.

La consistencia de estos resultados entre investigaciones sucesivas permite reconocer que la **configuración espacial del nogal constituye un factor importante en la función de hábitat**. Los árboles dispersos y los linderos tienden a aumentar la heterogeneidad del paisaje y pueden actuar como elementos de conexión entre áreas agrícolas y remanentes de vegetación, mientras que plantaciones y sistemas más homogéneos ofrecen condiciones estructurales distintas. Esta función no depende únicamente de la presencia de *J. neotropica*, sino también de su disposición espacial, densidad, estratificación de la vegetación y composición de las especies acompañantes.

En este sentido, el nogal desempeña un papel particularmente relevante cuando constituye el **componente arbóreo dominante o estructurante** del sistema. Su permanencia en el paisaje aporta cobertura vertical, sustratos, refugio y recursos que son utilizados por diferentes organismos, mientras que las especies acompañantes aumentan la complejidad del hábitat. Por ello, la biodiversidad observada debe interpretarse como resultado de la interacción entre *J. neotropica* y la estructura ecológica que se organiza alrededor de ella.

Las diferencias en la función de hábitat entre las configuraciones agroforestales se reflejan también en los índices de diversidad. La práctica de árboles dispersos presentó los mayores valores de Shannon-Wiener para flora y aves, mientras que la diversidad de insectos mostró valores prácticamente similares entre las cuatro configuraciones evaluadas.

Además de la flora, los insectos y las aves considerados en las investigaciones anteriores, los hongos representan otro componente de la biodiversidad asociada con los ecosistemas donde se desarrolla *J. neotropica*. Aunque la evidencia disponible todavía es limitada, los estudios realizados permiten reconocer tanto asociaciones micorrícicas directas con las raíces del nogal como la presencia de macromicetos en sistemas agroforestales en los que la especie forma parte del estrato arbóreo.

En parcelas de reforestación establecidas sobre pastizales degradados del sur del Ecuador, Haug et al. (2010) confirmaron mediante análisis molecular la presencia de hongos micorrícicos arbusculares en las raíces de plántulas de *J. neotropica*, incluidos representantes de los grupos *Glomus* A, *Glomus* B y Archaeosporales. Estos resultados demuestran una asociación directa entre el nogal andino y hongos microscópicos

colonizadores de sus raíces, aunque el estudio no evaluó experimentalmente sus efectos sobre la nutrición, el crecimiento o la supervivencia de las plántulas.

De manera complementaria, en el sistema agroforestal multiestrato del campus Yuyucocha, donde *J. neotropica* comparte el espacio con más de diez especies forestales y tres variedades de café, se registraron 15 cuerpos fructíferos de macromicetos correspondientes a cuatro taxones: *Lycoperdon* sp., *Pholiota* sp., *Laccaria fraterna* y *Stropharia* sp.; otras dos muestras no pudieron identificarse debido a su estado de conservación. Este registro evidencia la presencia de hongos macroscópicos en el sistema, potencialmente relacionados con procesos como la descomposición de la materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y las interacciones entre hongos y plantas. Sin embargo, debido a que no se analizaron las raíces ni se determinó el hospedero de cada taxón, estos macromicetos deben considerarse asociados con el sistema agroforestal en su conjunto y no específicamente con *J. neotropica*.

11.3.3.2 Continuidad de la cobertura arbórea y conectividad potencial

En paisajes transformados, los árboles remanentes, las cercas vivas y las franjas de vegetación pueden contribuir a reducir el aislamiento entre áreas con cobertura arbórea y a mantener espacios de refugio, alimentación y desplazamiento para distintos organismos. En este contexto, los ejemplares adultos de *J. neotropica* presentes en linderos, huertos y sistemas productivos pueden actuar como elementos estructurantes del paisaje, especialmente cuando sus copas se integran con las de otras especies y forman agrupaciones o franjas relativamente continuas.

En el sector Chorlaví, ubicado en el área periurbana de Ibarra, se observa la permanencia de nogales adultos dentro de una matriz compuesta por terrenos agrícolas, huertos, caminos y edificaciones. Esta configuración evidencia la capacidad de la especie para integrarse en espacios de transición entre lo rural y lo urbano y su potencial contribución a la continuidad de la cobertura arbórea. Aunque las imágenes no permiten demostrar una conectividad ecológica funcional —la cual requeriría evaluar, por ejemplo, el desplazamiento de fauna, la dispersión de semillas o el flujo genético—, sí muestran una conectividad estructural relevante para la conservación de la biodiversidad y la planificación de paisajes periurbanos. La Figura 11.14 ilustra la disposición de estos nogales y su relación espacial con los demás componentes del paisaje.

Figura 11.14

Juglans neotropica en la conectividad del paisaje periurbano de Chorlaví, Ibarra

Nota. **A)** Árboles adultos de *Juglans neotropica*, reconocibles por sus copas amplias, establecidos junto a un huerto de aguacate (*Persea americana*). **B)** Vista general de la franja arbórea en la que los nogales se integran con otras especies entre terrenos productivos, caminos y edificaciones del sector Chorlaví, área periurbana de Ibarra, Imbabura, Ecuador. En conjunto, las imágenes muestran la permanencia del nogal dentro de una matriz urbano-rural y su potencial contribución a la continuidad de la cobertura arbórea y la conectividad ecológica del paisaje. Fotografías con dron: Guillermo Varela.

11.3.3.3 Reciclaje de nutrientes

El reciclaje de nutrientes constituye un proceso fundamental para el mantenimiento de la fertilidad y el funcionamiento de los ecosistemas forestales. En *J. neotropica*, especie caducifolia de los bosques montanos andinos, la caída y posterior descomposición de la hojarasca permiten transferir materia orgánica y nutrientes desde la biomasa vegetal hacia el suelo, estableciendo un vínculo funcional entre el componente arbóreo, los organismos descomponedores y los ciclos biogeoquímicos.

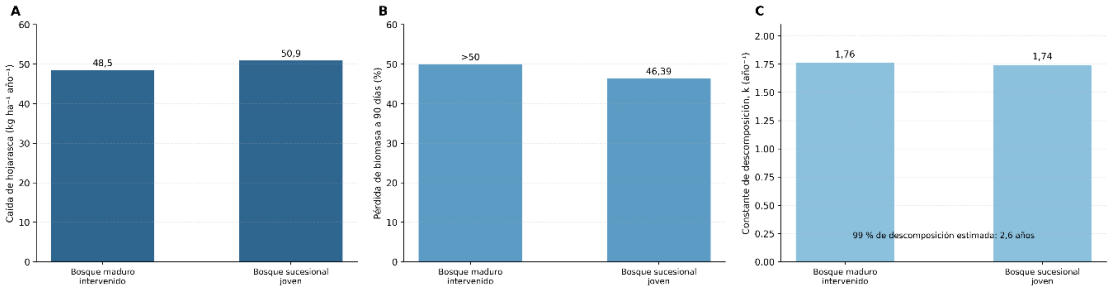
La evidencia específica disponible procede de bosques montanos de Pijao, Quindío, Colombia, donde Rave-Oviedo et al. (2013) evaluaron durante 12 meses la caída de hojarasca de *J. neotropica* en dos condiciones sucesionales: un **bosque maduro intervenido (BMI)** y un **bosque sucesional joven (BSJ)**. La producción registrada fue de **48,5 kg ha^{-1} año^{-1} en el BMI y 50,9 kg ha^{-1} año^{-1} en el BSJ**, sin diferencias significativas entre ambos sitios. La composición del material aportado al suelo varió entre las dos condiciones: en el bosque maduro intervenido predominó la fracción de frutos, que representó **50,3 %**, mientras que en el bosque sucesional joven la mayor proporción correspondió a hojas, con **44,5 %**.

Más allá de la cantidad de material incorporado, la velocidad de descomposición determina la rapidez con que sus componentes pueden reincorporarse a los ciclos del ecosistema. Mediante bolsas de hojarasca evaluadas durante seis meses, Rave-Oviedo et al. (2013) encontraron que en el bosque maduro intervenido el material perdió **más del 50 % de su peso inicial durante los primeros 90 días**, mientras que en el bosque sucesional joven la pérdida alcanzó **46,39 %** durante el mismo periodo. Las constantes de descomposición fueron similares entre sitios, con valores de **k = 1,76 año^{-1} y k = 1,74 año^{-1}**, respectivamente.

La producción de hojarasca y su posterior descomposición mostraron valores similares entre las dos condiciones forestales evaluadas. Aunque el bosque sucesional joven presentó una producción ligeramente mayor de hojarasca, la pérdida de biomasa y las constantes de descomposición fueron comparables entre ambos sitios, como se observa en la Figura 11.15.

Figura 11.15

Producción y descomposición de hojarasca de Juglans neotropica en dos condiciones de bosque montano andino



Nota. **A)** Caída anual de hojarasca en bosque maduro intervenido (48,5 kg ha^{-1} año^{-1}) y bosque sucesional joven (50,9 kg ha^{-1} año^{-1}). **B)** Pérdida de biomasa durante los primeros 90 días de descomposición: superior al 50 % en el bosque maduro intervenido y 46,39 % en el bosque sucesional joven. **C)** Constante de descomposición de la hojarasca, con valores de k = 1,76 año^{-1} y k = 1,74 año^{-1}, respectivamente. En ambos sitios se estimó un periodo aproximado de 2,6 años para alcanzar el 99 % de descomposición. Adaptado de Rave-Oviedo et al. (2013).

A partir de estas tasas se estimó un periodo aproximado de **2,6 años para alcanzar el 99 % de descomposición de la hojarasca** en ambas condiciones forestales. La rápida pérdida de biomasa estuvo asociada con la composición química del material, particularmente con una concentración de nitrógeno de **5,29 %** y una relación **C/N de 8,37**, características que favorecen la actividad de los organismos descomponedores y la transformación relativamente rápida de los residuos vegetales.

La relación entre calidad de la hojarasca y velocidad de descomposición es especialmente relevante para interpretar este servicio. La relación C/N constituye uno de los indicadores utilizados para evaluar la susceptibilidad de los residuos vegetales a la degradación, debido a que la composición química del material, junto con las condiciones de temperatura, humedad, características del suelo y actividad microbiana, determina la dinámica de la descomposición. En consecuencia, los valores registrados para *J. neotropica* muestran una hojarasca con condiciones favorables para una rápida transformación y reincorporación de materia orgánica al suelo.

Este proceso conecta directamente la fenología caducifolia del nogal con el funcionamiento edáfico. La caída periódica de hojas, frutos y otros residuos vegetales transfiere biomasa desde el dosel hacia la superficie del suelo; posteriormente, su fragmentación y descomposición generan sustratos para la edafofauna y los microorganismos y favorecen la incorporación de materia orgánica. De esta manera, *J. neotropica* participa en la **dinámica de nutrientes y materia orgánica** de los ecosistemas donde se desarrolla.

Debe considerarse, sin embargo, que la evidencia cuantitativa disponible procede de dos condiciones de bosque montano en Colombia. Por tanto, las tasas de producción y descomposición de hojarasca **no deben extrapolarse directamente a plantaciones o sistemas agroforestales ecuatorianos**, donde variables como clima, altitud, edad y

densidad del arbolado, manejo, composición de especies y propiedades edáficas pueden modificar sustancialmente estos procesos.

En conjunto, los estudios disponibles muestran que la hojarasca de *J. neotropica* participa en el retorno de materia orgánica y nutrientes al suelo y en su posterior transformación. Estos procesos permiten reconocer la participación de la especie en el reciclaje de nutrientes dentro de los ecosistemas donde se desarrolla. Su magnitud depende de las condiciones ambientales, la estructura del sistema y las propiedades del material vegetal, por lo que las tasas registradas en bosques montanos de Colombia no deben extrapolarse directamente a otros contextos.

11.3.4 Servicios culturales

Los servicios culturales comprenden los beneficios no materiales que las sociedades obtienen de los ecosistemas y de sus componentes, expresados en valores culturales, identitarios, espirituales, educativos, recreativos y estéticos. En el caso de *J. neotropica*, estos servicios adquieren especial relevancia por la estrecha relación histórica establecida entre la especie y las comunidades andinas, donde el nogal forma parte de conocimientos, prácticas y expresiones culturales vinculadas con el territorio.

En Ecuador, esta relación se manifiesta en diversos ámbitos, entre ellos los **saberes tradicionales, la gastronomía, la artesanía y ebanistería, la identidad territorial, el valor paisajístico y las oportunidades de educación y turismo vinculadas con la especie**. Estos aspectos, abordados desde una perspectiva histórica y biocultural en capítulos anteriores, se analizan aquí específicamente por su contribución al bienestar humano y por el valor cultural que las sociedades atribuyen a *J. neotropica* y a los paisajes donde está presente.

11.3.4.1 Valor cultural, identidad y memoria biocultural

El valor cultural de *J. neotropica* deriva de la relación histórica establecida entre la especie y las sociedades andinas. Más allá de los productos materiales obtenidos del árbol, su presencia en los paisajes rurales y urbanos, así como su incorporación a prácticas productivas, alimentarias, artesanales y tradicionales, ha contribuido a generar conocimientos, significados y formas de valoración que se transmiten entre generaciones. Desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos culturales, estas relaciones se expresan principalmente mediante la **identidad territorial, la memoria colectiva y el patrimonio biocultural** asociado con la especie.

En Ecuador, esta dimensión cultural es particularmente visible en la región andina, donde el nogal o tocte forma parte de prácticas y expresiones sociales que han perdurado en el tiempo. Su madera ha estado vinculada con la artesanía y la ebanistería; sus frutos, con preparaciones alimenticias tradicionales; y distintas partes del árbol, con conocimientos locales relacionados con tintes y otros usos. Estas manifestaciones, desarrolladas con mayor detalle en el capítulo dedicado a historia, cultura y patrimonio biocultural, adquieren aquí otra interpretación: además de constituir formas de aprovechamiento, representan **beneficios culturales derivados de la permanencia de la especie y del conocimiento construido socialmente alrededor de ella**.

Esta valoración también se manifiesta en la percepción contemporánea de las poblaciones locales. En Imbabura, las investigaciones sobre *J. neotropica* muestran que la especie es reconocida no únicamente por sus funciones productivas y ambientales, sino también como componente cultural y ornamental de los espacios rurales y urbanos. De esta manera, la presencia del nogal contribuye a mantener referentes naturales asociados con el territorio y favorece la continuidad de vínculos entre biodiversidad, paisaje e identidad local.

La importancia cultural de *J. neotropica* no se restringe al Ecuador. En la comunidad campesina de Cuspón, en los Andes peruanos, Ramírez Viena et al. (2020) registraron para la especie un **Índice Cultural de 0,92**, situándola entre las plantas de mayor valoración dentro del inventario etnobotánico local. Esta importancia estuvo relacionada con la diversidad de usos reconocidos por la población, entre ellos alimentación, medicina tradicional, construcción, elaboración de herramientas y obtención de tintes. Asimismo, investigaciones realizadas en Pamparomás, Áncash, identificaron al nogal entre las especies de elevada significancia cultural, evidenciando la relación existente entre diversidad de usos, conocimiento local y valoración social de las plantas.

La evidencia procedente de Ecuador y Perú permite reconocer que el valor cultural del nogal andino surge no de un uso aislado, sino de su **multifuncionalidad y permanencia dentro de los sistemas de vida andinos**. La convergencia de usos alimentarios, artesanales, medicinales y paisajísticos favorece la acumulación de conocimientos y prácticas que forman parte de la memoria biocultural de las comunidades. En este sentido, conservar *J. neotropica* implica también contribuir a mantener las relaciones sociales y culturales desarrolladas históricamente alrededor de la especie.

Sin embargo, este servicio cultural depende tanto de la conservación de los árboles como de la continuidad del conocimiento asociado con ellos. Las transformaciones de los sistemas productivos, los cambios socioculturales y la disminución de la transmisión intergeneracional pueden debilitar progresivamente estas relaciones. Por ello, la conservación del nogal andino debe considerar no solamente sus poblaciones y diversidad genética, sino también los **saberes, prácticas y expresiones culturales que le confieren significado dentro de los territorios andinos**.

11.3.4.2 Valor escénico, paisajístico y recreativo

La presencia de *J. neotropica* en espacios urbanos, rurales y agroforestales aporta una dimensión escénica y paisajística que trasciende sus funciones productivas y ecológicas. Su porte arbóreo, desarrollo de copa y cambios fenológicos contribuyen a la configuración visual de calles, parques, senderos, predios rurales y paisajes agropecuarios andinos. Desde la perspectiva de los servicios ecosistémicos culturales, estos atributos adquieren valor cuando son percibidos y apreciados por la población y contribuyen al disfrute, reconocimiento e identidad de los espacios donde la especie está presente.

En la ciudad de Ibarra, Valverde et al. (2023) analizaron la presencia y valoración de *J. neotropica* en la parroquia urbana San Francisco. El estudio determinó que

aproximadamente el **78 % de los individuos registrados se encontraba en calles y avenidas**, evidenciando una importante presencia de la especie en espacios de uso cotidiano. Además, **más del 96 % de las personas encuestadas manifestó interés en conservar el nogal como parte del arbolado de la parroquia**, resultado que refleja una elevada aceptación social de su permanencia en el paisaje urbano.

Esta valoración permite reconocer que el nogal constituye más que un elemento físico del arbolado urbano. Su permanencia en calles y espacios públicos contribuye a configurar la **imagen y el carácter paisajístico del entorno**, particularmente cuando se trata de árboles adultos que han formado parte del paisaje durante periodos prolongados. En este sentido, la preferencia expresada por los habitantes respecto de su conservación puede interpretarse como evidencia de un beneficio cultural asociado con la presencia de la especie, aunque la percepción paisajística depende también de las condiciones de manejo, estado sanitario, ubicación y relación de los árboles con la infraestructura urbana.

Esta relación con el entorno construido se ve reflejada en dinámicas de manejo específicas dentro de la misma urbe. En la parroquia de Caranqui, Toapanta Cueva (2026) reportó que la falta de planificación a largo plazo en la selección del arbolado urbano ha generado un notable conflicto infraestructural, donde el 46,9 % de los daños registrados en aceras son causados por el crecimiento de raíces superficiales de especies leñosas, incluyendo ejemplares de *J. neotropica* establecidos de forma inadecuada. Asimismo, este estudio evidenció una preocupante pérdida de representatividad del nogal andino frente al avance de especies exóticas invasoras dominantes como *Spathodea campanulata* (22,7 %) y *Fraxinus excelsior* (15,2 %). Estos hallazgos demuestran que, a pesar de la alta valoración social del nogal, la sostenibilidad de su valor escénico y paisajístico en Ibarra se encuentra condicionada a la implementación de técnicas de manejo radicular y a estrategias de reforestación urbana que prioricen el control de la competencia de flora introducida.

El componente recreativo se relaciona estrechamente con esta dimensión paisajística. En el mismo estudio de Valverde et al. (2023), la población identificó diferentes beneficios derivados de la presencia de *J. neotropica*, predominando la valoración de los beneficios ambientales (**58,6 %**) y, en menor proporción, de los beneficios sociales (**17,2 %**). Aunque estos porcentajes no permiten atribuir directamente a la especie efectos específicos sobre el bienestar humano, muestran que la población reconoce beneficios que trascienden el aprovechamiento material del árbol y que están relacionados con su presencia en los espacios compartidos.

La función paisajística y recreativa también se manifiesta en espacios universitarios. En el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, *J. neotropica* se encuentra integrada en diferentes configuraciones, entre ellas plantaciones, sistemas agroforestales, cortinas rompeviento, árboles productivos y áreas vinculadas con senderos. Esta diversidad de formas de establecimiento permite que la especie participe simultáneamente en la estructura ecológica y visual del campus y forme parte de espacios utilizados para actividades académicas, recorridos y contacto con el entorno natural.

En conjunto, la evidencia disponible permite reconocer en *J. neotropica* un **valor escénico, paisajístico y recreativo asociado con su permanencia en los espacios**

urbanos y rurales andinos. Este servicio cultural resulta particularmente evidente cuando los árboles forman parte de lugares de uso cotidiano y son reconocidos positivamente por la población. Su conservación, por tanto, no implica únicamente mantener un componente de la biodiversidad y del arbolado, sino también preservar elementos naturales que contribuyen a la configuración y valoración social del paisaje.

11.3.4.3 Turismo educativo y valoración biocultural

El turismo educativo constituye una expresión de los servicios ecosistémicos culturales cuando los espacios naturales y productivos permiten integrar recreación, aprendizaje, interpretación ambiental y acercamiento de la sociedad a los recursos naturales. En el caso de *J. neotropica*, esta función adquiere particular interés en sitios donde la especie forma parte de senderos, áreas demostrativas y sistemas de manejo que permiten interpretar simultáneamente sus atributos ecológicos, productivos y culturales.

Una experiencia documentada se encuentra en el Campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte, en Ibarra. Enríquez Santana et al. (2023) señalan que este espacio, además de cumplir funciones académicas y de investigación científica, mantiene vinculación con la comunidad y proporciona servicios ambientales, por lo que las visitas no responden exclusivamente a una finalidad turística, sino también educativa. Los autores destacan incluso la existencia de convenios con unidades educativas que realizan prácticas en el campus.

A partir de estas características, Enríquez Santana et al. (2023) formularon una propuesta de **sendero interpretativo ecológico con fines de educación ambiental**, orientada a organizar las visitas y facilitar la interpretación de los recursos naturales existentes en el campus. El estudio reconoce que el área posee potencial para actividades investigativas, educativas, recreativas, culturales y de vinculación debido a sus recursos forestales, planteando el sendero interpretativo como instrumento para articular estos componentes con una gestión responsable de las visitas.

La vinculación de esta propuesta con *J. neotropica* es explícita. Dentro de la zonificación del campus se identifica un **ensayo de nogal**, mientras que el circuito interpretativo incorpora específicamente una estación destinada a este ensayo y otra correspondiente al sistema agroforestal. Esta disposición permite utilizar al nogal como recurso demostrativo para interpretar aspectos relacionados con su establecimiento, manejo, investigación y funciones ecosistémicas dentro de un recorrido educativo.

La presencia de árboles adultos de *J. neotropica* en los espacios de recorrido del Campus Yuyucocha permite integrar la observación directa de la especie con actividades de interpretación ambiental y educación forestal. Una fila de nogales de 30 años forma parte del paisaje del campus y constituye un recurso demostrativo para acercar a estudiantes y visitantes al conocimiento y valoración de la especie (Figura 11.16).

Figura 11.16

Fila de árboles de Juglans neotropica de 30 años en un sendero del Campus Yuyucocha, Universidad Técnica del Norte

Nota. Los árboles forman parte de los espacios forestales y de recorrido del campus, donde *J. neotropica* constituye uno de los recursos utilizados para actividades académicas, demostrativas y de interpretación ambiental.

En este contexto, el valor cultural de *J. neotropica* no se limita a la contemplación del árbol. Su presencia en espacios interpretativos posibilita relacionar el conocimiento científico con los usos y significados desarrollados históricamente alrededor de la especie en los Andes. De esta manera, la interpretación puede integrar aspectos forestales y ecológicos con conocimientos asociados a su aprovechamiento alimentario, artesanal y tradicional, contribuyendo a una **valoración biocultural del nogal** sin desvincular los componentes naturales de las relaciones sociales construidas alrededor de ellos.

La experiencia de Yuyucocha muestra, por tanto, que *J. neotropica* puede formar parte de iniciativas de **turismo educativo e interpretación ambiental**, especialmente cuando su presencia se integra en circuitos que combinan investigación, enseñanza, recreación y vinculación con la sociedad. Este servicio cultural adquiere relevancia como mecanismo complementario para comunicar el valor de la especie y fortalecer su conservación mediante experiencias directas de aprendizaje.

11.3.4.4 Educación e investigación

La educación y la investigación constituyen servicios culturales cuando los ecosistemas y sus componentes proporcionan oportunidades para la generación, transmisión y apropiación social del conocimiento. En el caso de *J. neotropica*, este servicio adquiere particular relevancia por la diversidad de temas que pueden abordarse alrededor de la especie, desde su biología y ecología hasta la propagación, silvicultura, agroforestería, aprovechamiento, conservación y valoración de sus servicios ecosistémicos.

En Ecuador, las universidades han desempeñado un papel importante en la generación de conocimiento sobre *J. neotropica*. La investigación desarrollada en torno a la especie ha permitido la formación de estudiantes mediante tesis y trabajos de titulación, el establecimiento y seguimiento de ensayos de campo y la generación de publicaciones científicas. Esta producción académica, analizada cuantitativamente en el estado del arte presentado en el **capítulo 2**, no se reproduce aquí; interesa destacar que la permanencia de la especie en áreas experimentales y sistemas productivos proporciona un **recurso biológico para la enseñanza y la investigación aplicada**.

Esta función puede observarse particularmente en el Campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte. Enríquez Santana et al. (2023) reconocen al campus como un espacio destinado a actividades educativas, investigación científica y vinculación con la comunidad, además de sus funciones ambientales. La presencia de *J. neotropica* en áreas experimentales y dentro del circuito interpretativo propuesto permite articular la observación de la especie con procesos de enseñanza y educación ambiental; de manera específica, el recorrido incorpora una estación correspondiente al **ensayo de nogal** y otra destinada al sistema agroforestal.

El valor educativo de estos espacios trasciende la enseñanza convencional en el aula. Los árboles y ensayos establecidos permiten observar directamente procesos relacionados con crecimiento, arquitectura, fenología, interacción con otras especies y respuesta al manejo, y facilitan la realización de prácticas académicas y trabajos de investigación. De esta manera, *J. neotropica* funciona simultáneamente como **objeto de estudio y recurso didáctico**, favoreciendo el aprendizaje basado en la observación y experimentación en condiciones de campo.

La investigación cumple, además, una función estratégica para la conservación de la especie. El conocimiento generado permite reducir vacíos relacionados con su ecología, propagación, manejo y aprovechamiento sostenible y proporciona información para orientar decisiones de conservación *in situ* y *ex situ*. A su vez, la participación de estudiantes en estos procesos contribuye a formar capacidades profesionales para continuar investigando y manejando la especie en los paisajes andinos.

Desde la perspectiva de los servicios culturales, existe así una relación de retroalimentación entre **especie, educación e investigación**: la presencia de poblaciones, árboles y ensayos de *J. neotropica* posibilita generar conocimiento y formar estudiantes, mientras que ese conocimiento contribuye posteriormente a mejorar su conservación y manejo. En consecuencia, el nogal andino constituye no solamente un recurso ecológico y productivo, sino también un **recurso científico y educativo**, cuyo valor se incrementa cuando los resultados de investigación se integran en la enseñanza, la divulgación y la vinculación con la sociedad.

CAPÍTULO 12

Crecimiento, productividad y biometría forestal de *Juglans neotropica*

Capítulo

12

Crecimiento, productividad y biometría forestal de *Juglans neotropica*

Etapas representativas del crecimiento de *J. neotropica* en Ecuador. **A)** Plántula establecida en un área de restauración forestal, Yuyucocha, Imbabura. **B)** Árbol joven en un sistema agroforestal con café, Cananvalle, Imbabura. **C)** Medición de un árbol en crecimiento en la comunidad Ashambuela, Cotacachi, Imbabura. **D)** Árbol adulto en el bosque natural El Tundo, Loja. **E)** Árbol maduro, Alausí, Chimborazo. Fotografías A, B y E: Mario Añazco; C: Soledad Cuellar (2026); D: Augusto Pinzón

¿Por qué dos árboles de *Juglans neotropica*, establecidos el mismo año, en un mismo sitio y bajo condiciones de establecimiento aparentemente semejantes, pueden seguir trayectorias de crecimiento y desarrollo diferentes? Esta pregunta ha orientado durante las últimas décadas buena parte de la investigación en dinámica de rodales y constituye uno de los fundamentos científicos de la silvicultura moderna. Comprender las causas de esa variabilidad resulta esencial para interpretar el desarrollo de los bosques y plantaciones y fundamentar decisiones silviculturales coherentes con los objetivos de manejo de cada sistema forestal, incluyendo plantaciones destinadas a la producción de madera, sistemas agroforestales, programas de restauración ecológica, conservación genética, protección ambiental y otras modalidades de establecimiento.

La respuesta a esta pregunta no reside en una única causa. El crecimiento de los árboles constituye una propiedad emergente de múltiples procesos fisiológicos, ecológicos y silviculturales que interactúan de manera continua durante el desarrollo del rodal. La competencia entre árboles modifica progresivamente la arquitectura y el tamaño de la copa; estos cambios afectan la disponibilidad de follaje fotosintéticamente activo y, por consiguiente, la producción y asignación de fotoasimilados hacia el crecimiento en altura, diámetro, raíces, reproducción y otros tejidos. Desde esta perspectiva, el desarrollo del rodal no puede interpretarse únicamente a partir de la edad cronológica de los árboles ni definirse exclusivamente mediante edades de intervención previamente establecidas, sino mediante el análisis integrado de los procesos que regulan su crecimiento, vigor y capacidad de respuesta frente a la competencia y al manejo silvicultural (Galloway et al., 2001; Oliver y Larson, 1996).

Esta visión representa un cambio conceptual respecto a los enfoques tradicionales centrados exclusivamente en los valores promedio de crecimiento. Si bien indicadores como la altura, el diámetro, el área basal y el volumen constituyen herramientas fundamentales para describir el desarrollo de una especie, los valores promedio por sí solos rara vez explican la variabilidad observada entre individuos aparentemente similares ni los procesos que la generan. Árboles de la misma edad y creciendo bajo condiciones ambientales semejantes pueden seguir trayectorias de desarrollo contrastantes como resultado de diferencias en su potencial genético, la estructura de la copa, la intensidad de la competencia, la disponibilidad de recursos, los objetivos de manejo, el historial silvicultural y otros factores que interactúan simultáneamente. En consecuencia, comprender las causas de la variación adquiere tanta importancia como estimar las tendencias generales de crecimiento, ya que dicha variabilidad proporciona información esencial para interpretar la dinámica del rodal y orientar decisiones silviculturales acordes con el estado de desarrollo del sistema forestal.

En Ecuador, el conocimiento sobre el crecimiento de *J. neotropica* ha avanzado de manera significativa durante las dos últimas décadas mediante investigaciones realizadas en bosques naturales, plantaciones forestales, sistemas agroforestales y ensayos experimentales establecidos en diferentes regiones andinas. Sin embargo, esta información ha sido generada bajo diferentes objetivos de investigación, metodologías, edades de evaluación, condiciones de establecimiento y propósitos de manejo, dificultando su integración para construir una visión nacional sobre las trayectorias de crecimiento de la especie y su aplicación al manejo silvicultural. Al mismo tiempo, esta diversidad de enfoques pone de manifiesto que aún existen aspectos que requieren

investigación adicional, particularmente aquellos relacionados con las causas de la variabilidad entre individuos y rodales, la influencia de la calidad genética del material de propagación, la interacción entre competencia y arquitectura de copa, y la respuesta del crecimiento bajo diferentes objetivos de manejo.

En consecuencia, el crecimiento de *J. neotropica* no debe interpretarse como un fin en sí mismo, sino como un proceso biológico cuya comprensión proporciona elementos para apoyar decisiones silviculturales acordes con los objetivos de manejo y el estado de desarrollo del rodal. Bajo esta perspectiva, el presente capítulo integra la información científica disponible y los resultados originales obtenidos durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) con el propósito de analizar la dinámica del crecimiento de la especie, interpretar los procesos que explican la variabilidad observada entre individuos y rodales, y aportar bases científicas que contribuyan a orientar el manejo silvicultural y el aprovechamiento sostenible del nogal en diferentes condiciones ecológicas de Ecuador.

12.1 Fundamentos conceptuales del crecimiento y la biometría forestal

La comprensión del crecimiento de los árboles ha evolucionado desde enfoques centrados en la descripción de variables dasométricas hacia modelos que interpretan el desarrollo del rodal como un sistema dinámico en el que interactúan simultáneamente factores genéticos, fisiológicos, ecológicos y silviculturales. Desde esta perspectiva, el crecimiento no constituye un fenómeno aislado ni puede explicarse únicamente mediante relaciones entre edad, altura, diámetro o volumen, sino como la expresión integrada de los procesos que regulan el desarrollo del árbol y del rodal.

En consecuencia, el análisis del crecimiento requiere un **enfoque sistémico** que permita comprender no solo cuánto crecen los árboles, sino también por qué presentan trayectorias de desarrollo diferentes aun cuando pertenecen a la misma especie y se establecen bajo condiciones aparentemente semejantes. Esta aproximación reconoce que la variabilidad observada entre individuos y rodales constituye una característica inherente de los ecosistemas forestales y que dicha variación proporciona información esencial para interpretar los procesos que regulan la productividad, comprender la dinámica del rodal y fundamentar las decisiones silviculturales.

Diversos estudios sobre dinámica de rodales han documentado que la competencia modifica progresivamente la arquitectura y el tamaño de la copa; estos cambios afectan la disponibilidad de follaje fotosintéticamente activo y, en consecuencia, la producción de biomasa. La comprensión de estas respuestas resulta fundamental para definir la oportunidad, intensidad y tipo de intervenciones silviculturales (Galloway et al., 2001; Oliver y Larson, 1996).

En silvicultura, la interpretación del crecimiento y la definición de las intervenciones de manejo no dependen exclusivamente del comportamiento biológico de la especie. Las decisiones relacionadas con el espaciamiento, las podas, los raleos, la intensidad del manejo o el momento del aprovechamiento están condicionadas, en primer lugar, por el objetivo de establecimiento del rodal. En este sentido, la silvicultura tropical integra el conocimiento del crecimiento y de la respuesta de los árboles a las intervenciones como fundamento para regular la estructura y productividad de los rodales

de acuerdo con los objetivos de manejo (Wadsworth, 2000). Una plantación destinada a la producción de madera de alta calidad requiere estrategias silviculturales diferentes a las aplicadas en sistemas agroforestales, plantaciones orientadas a la restauración ecológica, programas de conservación genética o sistemas con fines de protección ambiental.

Por consiguiente, el crecimiento debe interpretarse siempre en función de los objetivos del manejo y no como un proceso independiente de ellos. Asimismo, una misma especie puede requerir estrategias silviculturales diferentes según los objetivos del sistema, las condiciones del sitio y el estado de desarrollo del rodal. En este contexto, la silvicultura se entiende como un proceso continuo de **toma de decisiones** fundamentadas en la interpretación del estado de desarrollo del rodal y en los objetivos del manejo, más que en la aplicación de tratamientos definidos exclusivamente por la edad de los árboles.

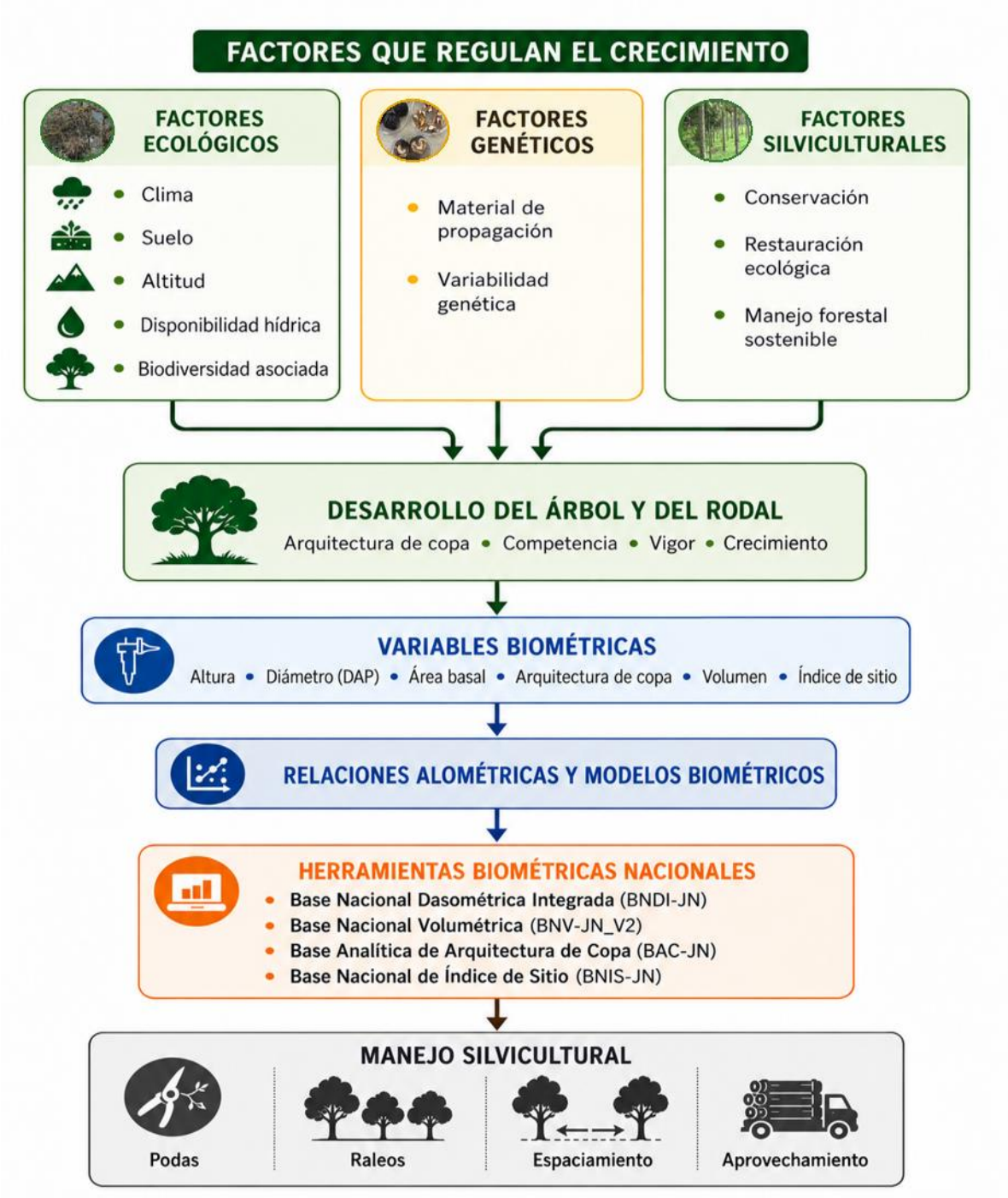
La Figura 12.1 resume el marco conceptual que orienta la interpretación del crecimiento y del manejo silvicultural desarrollada en este capítulo. En ella, la dinámica del crecimiento de *J. neotropica* se representa como un sistema integrado en el que las condiciones ambientales y del sitio, el componente genético y el manejo silvicultural interactúan en la determinación de las trayectorias de crecimiento y de la arquitectura del árbol. Las relaciones alométricas permiten caracterizar estas respuestas estructurales y aportar información sobre la competencia y el estado de desarrollo de los individuos y rodales, proporcionando elementos para apoyar las decisiones silviculturales.

Bajo este marco conceptual, el presente capítulo integra información proveniente de investigaciones desarrolladas en bosques naturales, plantaciones forestales, sistemas agroforestales y otros ensayos establecidos en diferentes regiones del Ecuador, complementándola con resultados originales obtenidos durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). La integración de estas fuentes permitió analizar patrones de crecimiento, relaciones alométricas, índices de sitio y variables de productividad desde una perspectiva nacional, reconociendo explícitamente que las trayectorias de crecimiento representan tendencias generales cuya expresión depende de la interacción entre múltiples factores biológicos, ambientales y silviculturales.

Asimismo, este enfoque reconoce que la evidencia actualmente disponible no agota la comprensión de la dinámica del crecimiento de la especie. Por el contrario, identifica preguntas cuya respuesta requerirá investigaciones futuras, particularmente aquellas relacionadas con la variabilidad entre individuos y rodales, la influencia del origen y la calidad del material de propagación, la interacción entre competencia y arquitectura de copa, y la respuesta del crecimiento bajo diferentes objetivos de manejo.

Figura 12.1

Modelo conceptual del crecimiento, la productividad y la biometría forestal de Juglans neotropica



Nota. El crecimiento de *J. neotropica* resulta de la interacción entre factores ecológicos, genéticos y silviculturales que influyen sobre el desarrollo del árbol y del rodal. Las variables biométricas y las relaciones derivadas de su análisis constituyen la base de las herramientas nacionales BNDI-JN, BNV-JN-V2, BAC-JN y BNIS-JN, desarrolladas para caracterizar el crecimiento, la productividad y apoyar la planificación silvicultural de la especie en Ecuador.

12.1.1 Enfoque metodológico general

La información presentada en este apartado se construyó mediante la integración de resultados provenientes de investigaciones desarrolladas en diferentes regiones del Ecuador sobre *J. neotropica*, incluyendo estudios realizados en bosques naturales, plantaciones forestales, sistemas agroforestales, arbolado urbano y ensayos experimentales establecidos bajo distintas condiciones ecológicas y de manejo. Estos trabajos fueron complementadas con información original generada durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), que incorporó mediciones de campo, evaluaciones dasométricas, análisis de relaciones alométricas y observaciones sobre el crecimiento y desarrollo de la especie en diferentes etapas de establecimiento.

Dado que las investigaciones disponibles fueron desarrolladas con objetivos, metodologías, edades de evaluación, densidades de plantación y condiciones de sitio diferentes, sus resultados no fueron considerados directamente equivalentes. La información fue sometida a un proceso de selección, validación, homologación y armonización orientado a hacer comparables las principales variables dasométricas y a identificar patrones generales de crecimiento y relaciones funcionales.

La armonización consideró la homologación de las principales variables utilizadas en los diferentes estudios, incluyendo edad, altura total, diámetro a la altura del pecho (DAP), área basal, volumen, dimensiones de copa e indicadores de calidad de sitio, empleando unidades de medida comparables y criterios uniformes para su interpretación. Cuando fue necesario, la información fue reorganizada para facilitar la construcción de tendencias nacionales de crecimiento y el análisis de relaciones alométricas entre variables estructurales de la especie.

Desde esta perspectiva, las curvas, modelos y relaciones presentados en este capítulo representan **tendencias generales derivadas de la evidencia científica actualmente disponible para Ecuador**, más que modelos predictivos aplicables a cualquier plantación o condición ecológica. En consecuencia, los resultados deben interpretarse considerando que el crecimiento de *J. neotropica* responde a la interacción entre múltiples factores, entre ellos la calidad genética del material de propagación, las condiciones del sitio, la competencia entre árboles, la historia silvicultural del rodal y otros procesos ecológicos que contribuyen a explicar la variabilidad observada entre individuos y poblaciones.

Este enfoque metodológico reconoce que los valores promedio constituyen herramientas útiles para sintetizar tendencias generales; sin embargo, la interpretación del crecimiento no debe limitarse a dichos promedios. La variabilidad observada entre árboles y rodales aporta información igualmente relevante para comprender la dinámica del crecimiento y orientar las decisiones de manejo silvicultural bajo diferentes condiciones ambientales y de establecimiento.

Dentro de este contexto, el análisis desarrollado se fundamentó en la evaluación integrada de variables dasométricas, relaciones alométricas e indicadores de productividad comúnmente utilizados en silvicultura para interpretar el desarrollo de árboles y rodales. La selección de estas variables respondió a su capacidad para describir diferentes dimensiones del crecimiento y aportar información complementaria sobre la

estructura, el vigor y la respuesta de la especie frente a distintas condiciones ambientales y de manejo.

Entre las variables dasométricas se consideraron la altura total, el diámetro a la altura del pecho (DAP), el área basal y el volumen, por constituir indicadores ampliamente utilizados para caracterizar el crecimiento y la productividad forestal. Estas variables fueron analizadas conjuntamente con atributos estructurales como el diámetro y la longitud de la copa, los cuales permiten interpretar la ocupación del espacio, el grado de competencia entre individuos y la capacidad potencial del árbol para mantener un crecimiento sostenido.

Además de la evaluación individual de cada variable, el análisis incorporó relaciones alométricas entre altura, diámetro y dimensiones de la copa. Estas relaciones no fueron interpretadas únicamente como asociaciones estadísticas, sino como expresiones funcionales del desarrollo del árbol y de su respuesta a la competencia, al ambiente y al manejo silvicultural. Desde esta perspectiva, las relaciones alométricas constituyen herramientas útiles para comprender la dinámica del crecimiento y apoyar la interpretación de los procesos que regulan el desarrollo del rodal.

El crecimiento también fue analizado en función de la edad de los árboles, reconociendo que esta variable representa una referencia cronológica necesaria para comparar investigaciones desarrolladas bajo diferentes condiciones. Sin embargo, la edad no fue considerada un predictor único del desarrollo de la especie. La interpretación de las trayectorias de crecimiento incorporó simultáneamente información relacionada con la calidad del sitio, las características del material de propagación, la competencia entre árboles, la historia de manejo y otros factores que contribuyen a explicar la variabilidad observada entre individuos y poblaciones.

Con el propósito de integrar y analizar de manera consistente estas variables, durante el desarrollo de la presente investigación se construyeron cuatro bases nacionales especializadas, cada una orientada a un componente específico del crecimiento y la productividad de *J. neotropica* (Tabla 12.1).

Tabla 12.1

Bases nacionales desarrolladas para el análisis del crecimiento, la productividad y la biometría forestal de Juglans neotropica

Base	Finalidad
Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN)	Crecimiento en diámetro y altura
Base Nacional Volumétrica (BNV-JN-V2)	Volumen total y comercial
Base Nacional de Arquitectura de Copa (BAC-JN)	Arquitectura y relaciones de copa
Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN)	Índice de sitio

Cada una de estas bases fue construida mediante procedimientos específicos de selección, validación y armonización de la información, descritos en los apartados correspondientes de este capítulo. En consecuencia, las curvas, modelos e indicadores desarrollados representan tendencias nacionales derivadas de la evidencia científica

actualmente disponible para Ecuador y no modelos universales aplicables indistintamente a cualquier condición de establecimiento.

12.1.2. Herramientas biométricas para el análisis del crecimiento

Las herramientas biométricas desarrolladas y utilizadas en este capítulo constituyen representaciones simplificadas de procesos biológicos y ecológicos que permiten describir, analizar e interpretar diferentes componentes del crecimiento de *J. neotropica*. Entre ellos se incluyen modelos de crecimiento en altura y diámetro, relaciones alométricas, índices de sitio, estimaciones de área basal y volumen, así como otras relaciones funcionales empleadas para comprender la dinámica estructural de la especie bajo distintas condiciones ecológicas y de manejo.

Desde esta perspectiva, los modelos no deben interpretarse como descripciones exactas del comportamiento de todos los individuos o rodales, sino como representaciones cuantitativas de patrones observados en la información disponible. Su utilidad radica en describir tendencias, estimar relaciones entre variables y apoyar la interpretación y proyección del crecimiento dentro del dominio de los datos y de las condiciones para las cuales fueron desarrollados.

La capacidad explicativa de estos modelos depende de la calidad y representatividad de la información utilizada para su construcción. En consecuencia, sus resultados deben analizarse considerando el contexto ecológico, las condiciones del sitio, la procedencia del material de propagación, la competencia entre individuos, el historial silvicultural y los objetivos de manejo bajo los cuales fueron obtenidos los datos. Esta interpretación contextual resulta particularmente importante en *J. neotropica*, cuya distribución natural comprende ambientes andinos con una elevada heterogeneidad ambiental y una amplia diversidad de condiciones de establecimiento.

Los modelos presentados en este capítulo fueron seleccionados por su utilidad para apoyar la interpretación del crecimiento y la planificación silvicultural. En conjunto, permiten analizar la evolución del rodal desde diferentes escalas, desde el crecimiento individual de los árboles hasta la productividad del rodal, integrando variables estructurales que posteriormente sirven de base para estimar producción, evaluar alternativas de manejo y comprender las respuestas de la especie frente a diferentes escenarios de establecimiento y desarrollo.

En concordancia con el marco conceptual adoptado, los modelos constituyen herramientas de apoyo para la toma de decisiones y no sustituyen la evaluación técnica realizada en campo. La definición de prácticas como el espaciamiento inicial, las podas, los raleos o el momento del aprovechamiento requiere integrar la información proporcionada por los modelos con la observación directa del estado de desarrollo del rodal, las características del sitio y los objetivos específicos del sistema de manejo. Bajo esta perspectiva, la modelización se entiende como un instrumento para reducir la incertidumbre y fortalecer el criterio silvicultural, más que como un mecanismo para establecer recomendaciones universales.

Sobre la base del marco conceptual y metodológico descrito anteriormente, en los apartados siguientes se analizan de manera progresiva las principales variables de

crecimiento y productividad de *J. neotropica*. El desarrollo inicia con la dinámica del crecimiento en altura y diámetro, continúa con las relaciones alométricas y la estimación del volumen, y culmina con la construcción del primer índice de sitio desarrollado para la especie en Ecuador.

12.2 Dinámica del crecimiento y productividad de *J. neotropica*

En *J. neotropica*, el crecimiento y la productividad presentan una elevada variabilidad como consecuencia de la diversidad de ambientes donde se distribuye naturalmente la especie y de las diferentes modalidades de establecimiento utilizadas en Ecuador, incluyendo bosques naturales, plantaciones forestales, sistemas agroforestales, árboles en linderos, cortinas rompevientos y arbolado urbano. Esta heterogeneidad condiciona trayectorias de desarrollo diferenciadas entre individuos y rodales, por lo que la interpretación de los patrones de crecimiento requiere considerar simultáneamente las características del sitio, la competencia, el desarrollo de la copa, la calidad del material de propagación y el historial de manejo silvicultural.

Las evidencias presentadas en este apartado corresponden a una síntesis de investigaciones desarrolladas en distintas regiones del país y a resultados originales obtenidos durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). En concordancia con el marco metodológico expuesto en la sección 12.1, las curvas de crecimiento, las relaciones funcionales y los indicadores de productividad deben interpretarse como **tendencias generales** derivadas de la evidencia científica disponible y no como modelos predictivos universales aplicables a cualquier condición de establecimiento. Su principal aporte consiste en proporcionar elementos para comprender la dinámica del crecimiento de la especie y apoyar la planificación silvicultural bajo diferentes objetivos de manejo.

El análisis se desarrolla de manera progresiva, comenzando con la evaluación del crecimiento en altura y diámetro, continuando con el estudio de las relaciones alométricas entre el desarrollo del fuste y de la copa, y finalizando con la interpretación de la productividad del rodal y sus implicaciones para el manejo silvicultural. Esta secuencia responde al principio de que las decisiones relacionadas con el espaciamiento, las podas, los raleos o el aprovechamiento no deben fundamentarse exclusivamente en la edad de los árboles, sino en la comprensión del estado de desarrollo del rodal y de los procesos que regulan su crecimiento.

12.2.1 Crecimiento en altura total: patrones, variabilidad e implicaciones silviculturales

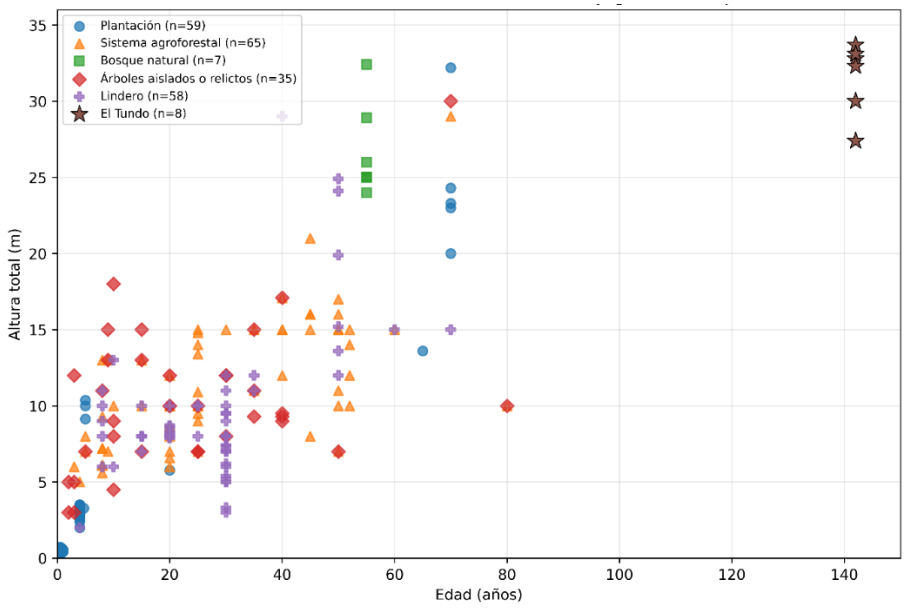
La altura total constituye uno de los indicadores dasométricos más utilizados para evaluar el crecimiento y el vigor de las especies forestales, debido a que integra la respuesta fisiológica del árbol frente a las condiciones ambientales, la disponibilidad de recursos y las prácticas de manejo implementadas durante su desarrollo. En especies destinadas simultáneamente a la restauración ecológica, la producción de madera y los sistemas agroforestales, esta variable permite comparar el desempeño entre sitios, identificar ambientes con mayor productividad y establecer referencias técnicas para la planificación silvicultural y la evaluación de la calidad de sitio.

Con el propósito de generar una síntesis nacional del crecimiento en altura del nogal, la información disponible fue integrada en la **Base Nacional Dasométrica Integrada de *Juglans neotropica* (BNDI-JN, versión 3)**, construida mediante la armonización de registros procedentes de literatura científica auditada, inventarios forestales, la base nacional para índice de sitio y datos originales obtenidos durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). La base fue sometida a un proceso de auditoría estructural, estadística y biológica, en el que se verificó la identidad taxonómica, la consistencia de las unidades de medida, la confiabilidad de la edad, la presencia de registros duplicados y la coherencia entre edad y crecimiento.

Como resultado de este proceso se evaluaron 264 registros, de los cuales 232 cumplieron los criterios de calidad establecidos para el análisis de la altura total. Fueron excluidos registros sin información de edad o altura, duplicados identificados entre bases independientes y un registro con un valor biológicamente inconsistente. Esta depuración permitió disponer de una cronosecuencia nacional integrada para *J. neotropica* en Ecuador. La relación entre la edad y la altura total de los registros validados se presenta en la Figura 12.2, la cual constituye una cronosecuencia nacional construida para la especie a partir de una base de datos integrada y auditada.

Figura 12.2

Cronosecuencia nacional del crecimiento en altura total de Juglans neotropica en Ecuador



Nota. La figura integra 232 registros válidos procedentes de la Base Nacional Dasométrica Integrada de *J. neotropica* (BNDI-JN, versión 3). Cada punto representa una observación independiente obtenida de árboles individuales o registros agregados previamente auditados. Esta corresponde a una cronosecuencia nacional y no a una curva de crecimiento derivada del seguimiento longitudinal de un mismo rodal. Los registros de la Reserva Natural El Tundo incorporan la edad media determinada mediante análisis dendrocronológico (Reyes, 2024).

La cronosecuencia nacional evidencia un incremento progresivo de la altura total conforme aumenta la edad de los árboles, describiendo un patrón general de crecimiento coherente con la biología de la especie. No obstante, la dispersión de los registros demuestra que la edad explica únicamente una parte de la variabilidad observada. En prácticamente todas las clases de edad existen diferencias importantes entre localidades, reflejando la influencia conjunta de la calidad del sitio, las condiciones climáticas, el origen genético del material vegetal, la densidad de establecimiento y las prácticas silviculturales implementadas durante el desarrollo de las plantaciones.

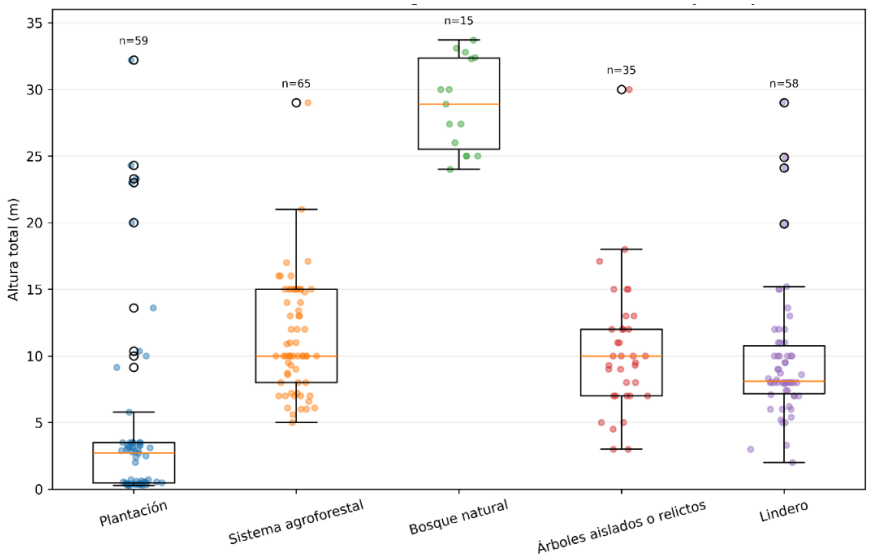
Aunque la cronosecuencia permite analizar el comportamiento del crecimiento a lo largo del tiempo, también resulta importante comparar la variabilidad observada entre los diferentes sistemas de establecimiento y manejo donde la especie ha sido evaluada. Esta comparación se presenta en la Figura 12.3.

La incorporación de registros con edades comprendidas entre **0,5 y 142 años** permitió extender considerablemente el horizonte temporal de la síntesis nacional. Mientras las primeras décadas de crecimiento se encuentran representadas principalmente por plantaciones, sistemas agroforestales e inventarios de árboles individuales, las edades más avanzadas corresponden a rodales maduros y bosques naturales, destacando la Reserva Natural El Tundo como el principal referente nacional para árboles de gran edad.

Con el fin de analizar la variabilidad del crecimiento entre los diferentes contextos de establecimiento, la distribución de las alturas fue comparada entre los principales sistemas donde la especie ha sido evaluada en Ecuador.

Figura 12.3

Distribución de la altura total de Juglans neotropica según el sistema de establecimiento y manejo en Ecuador



Nota. Cada punto representa un registro independiente incorporado a la Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN, versión 3). La línea central corresponde a la mediana, la caja representa el rango intercuartílico y los bigotes muestran la dispersión de los datos. Sobre cada categoría se presenta el tamaño de muestra (*n*).

La comparación entre sistemas muestra que la mayor disponibilidad de información corresponde a sistemas agroforestales, plantaciones y linderos, resultado del importante volumen de datos primarios incorporados durante el Programa *Juglans* y el inventario nacional. En contraste, los registros provenientes de bosques naturales continúan siendo relativamente escasos; sin embargo, poseen un elevado valor ecológico al representar poblaciones desarrolladas bajo condiciones naturales durante largos periodos de tiempo. Esta distribución confirma que la información disponible continúa concentrándose en etapas tempranas e intermedias del desarrollo de la especie, mientras que los árboles maduros siguen siendo limitados. Los estadísticos descriptivos obtenidos para las diferentes clases de edad se presentan en la Tabla 12.2.

Tabla 12.2

Estadísticos descriptivos de la altura total de Juglans neotropica según clases de edad en Ecuador

Clase de edad	n	Mínimo (m)	Media (m)	Máximo (m)	DE (m)	CV (%)	Localidad con el mayor valor
0–5	63	0,27	2,77	12,00	2,76	99,34	Piñas, El Oro
>5–15	33	4,50	9,61	18,00	3,25	33,84	Peñaherrera, Imbabura
>15–30	69	3,00	8,85	15,00	2,52	28,48	Jijón y Caamaño, Carchi
>30–60	48	7,00	16,01	32,40	6,30	39,34	Carigan, Loja
>60–100	11	10,00	20,95	32,20	7,90	37,72	La Argelia, Loja
>100	8	27,40	30,84	33,70	2,52	8,16	El Tundo, Loja

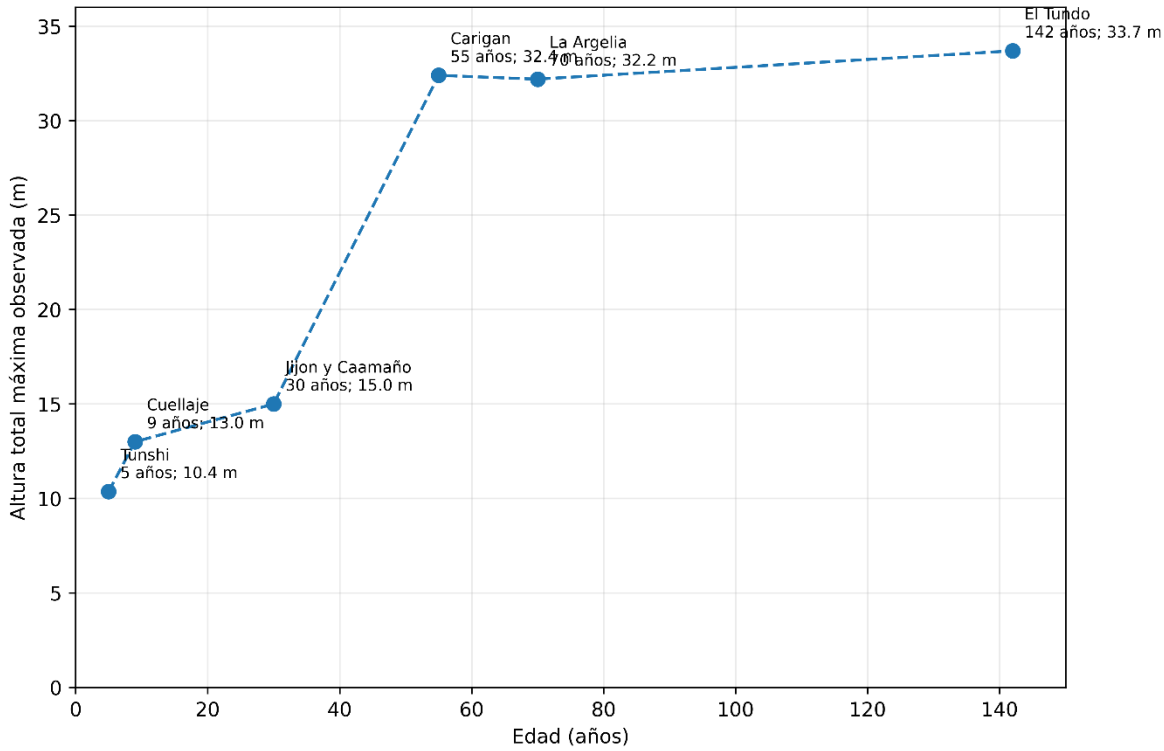
La síntesis estadística muestra una tendencia general de aumento de la altura media con la edad, desde 2,77 m en la clase de 0–5 años hasta 30,84 m en los registros superiores a 100 años. Sin embargo, esta tendencia no es monotónica entre todas las clases: la media de 9,61 m registrada entre >5–15 años disminuye a 8,85 m entre >15–30 años. Esta variación refleja la heterogeneidad de procedencias, sitios, sistemas de establecimiento y tamaños de muestra que integran la cronosecuencia y confirma que las clases de edad no representan el seguimiento longitudinal de un mismo rodal.

Con el propósito de identificar el potencial máximo de crecimiento observado en Ecuador, se seleccionaron los registros de mayor altura dentro de cada clase de edad, construyéndose una trayectoria de referencia que sintetiza el desempeño alcanzado por la especie bajo condiciones particularmente favorables.

Además de describir la variabilidad del crecimiento, resulta útil identificar el potencial máximo de desarrollo observado para la especie bajo las condiciones más favorables registradas en Ecuador. Para ello, la Figura 12.4 integra los mayores valores de altura total documentados en cada clase de edad, configurando una trayectoria de crecimiento potencial basada en observaciones de campo.

Figura 12.4

Trayectoria del crecimiento potencial observado de Juglans neotropica en Ecuador



Nota. La trayectoria une el mayor valor registrado para cada clase de edad dentro de la Base Nacional Dasométrica Integrada. La línea se incorpora únicamente para facilitar la interpretación visual y no representa un modelo matemático de crecimiento ni una curva de índice de sitio.

La trayectoria potencial evidencia que localidades como **Tunshi**, **Cuellaje**, **Jijón y Caamaño**, **Carigan**, **La Argelia** y **El Tundo** representan, hasta el momento, las mejores expresiones documentadas del crecimiento en altura de la especie en Ecuador. Estos sitios no deben interpretarse únicamente como valores máximos aislados, sino como referencias silviculturales de alto interés para futuras investigaciones sobre calidad de sitio, mejoramiento genético y productividad forestal.

La variabilidad observada entre provincias y sistemas refleja la acción conjunta de numerosos factores, entre ellos la fertilidad y profundidad del suelo, la disponibilidad hídrica, la altitud, el régimen climático, la competencia entre individuos, la calidad genética del material de propagación y las intervenciones silviculturales aplicadas durante las primeras etapas del desarrollo. En consecuencia, los valores obtenidos en esta síntesis deben interpretarse como referencias nacionales para la comparación del desempeño de nuevas plantaciones y no como metas universales aplicables a cualquier condición ambiental.

Desde la perspectiva del manejo forestal, la construcción de una cronosecuencia nacional basada en una base de datos integrada constituye una herramienta para evaluar

el crecimiento observado en nuevas plantaciones, identificar ambientes con alto potencial productivo y orientar el establecimiento de parcelas permanentes destinadas a la construcción futura de curvas nacionales de crecimiento e índices de sitio. Asimismo, proporciona una base objetiva para la validación de modelos de productividad específicos para *J. neotropica*.

Los patrones de crecimiento en altura observados en la Base Nacional Dasométrica Integrada de *Juglans neotropica* (BNDI-JN) concuerdan con los principios clásicos de la silvicultura descritos por Daniel et al. (1979), Evans (2004) y Galloway (1993), quienes señalan que la altura constituye uno de los mejores indicadores de la productividad del sitio durante las primeras etapas del desarrollo de los rodales. Asimismo, la marcada variabilidad observada entre árboles de edades semejantes confirma que el crecimiento en altura no depende exclusivamente de la edad, sino de la interacción entre la calidad del sitio, las condiciones climáticas, el origen genético del material vegetal y las prácticas silviculturales aplicadas, tal como ha sido documentado para numerosas especies forestales tropicales y subtropicales.

En este contexto, la cronosecuencia nacional desarrollada para *J. neotropica* no solo confirma los principios generales del crecimiento forestal descritos para otras especies del género *Juglans* y para especies forestales de alto valor maderable, sino que además aporta la primera referencia cuantitativa integrada sobre el crecimiento en altura de la especie en Ecuador, constituyendo una base científica para futuras investigaciones sobre productividad, calidad de sitio y manejo silvicultural.

Finalmente, aunque la incorporación de árboles con edades superiores a un siglo amplía significativamente el conocimiento disponible sobre la especie, la limitada representación de rodales maduros continúa siendo una de las principales restricciones para comprender la dinámica del crecimiento durante las fases avanzadas del ciclo de vida. En este contexto, el fortalecimiento de la red nacional de parcelas permanentes y la continuidad del monitoreo constituyen prioridades para consolidar futuros modelos de crecimiento y manejo silvicultural de *J. neotropica* en Ecuador.

12.2.2 Desarrollo de la altura comercial: calidad del fuste e implicaciones para la producción de madera

La altura comercial constituye uno de los indicadores dasométricos de mayor importancia para evaluar el potencial productivo de una especie forestal, ya que representa la longitud del fuste que reúne las características necesarias para su aprovechamiento industrial. A diferencia de la altura total, que refleja principalmente el crecimiento biológico del árbol, la altura comercial integra además el efecto de la competencia por la luz, la autopoda natural, la arquitectura del árbol y las prácticas silviculturales aplicadas durante el establecimiento y desarrollo de la plantación. En consecuencia, esta variable permite evaluar simultáneamente el crecimiento del árbol y la calidad potencial de la madera destinada a la producción de trozas.

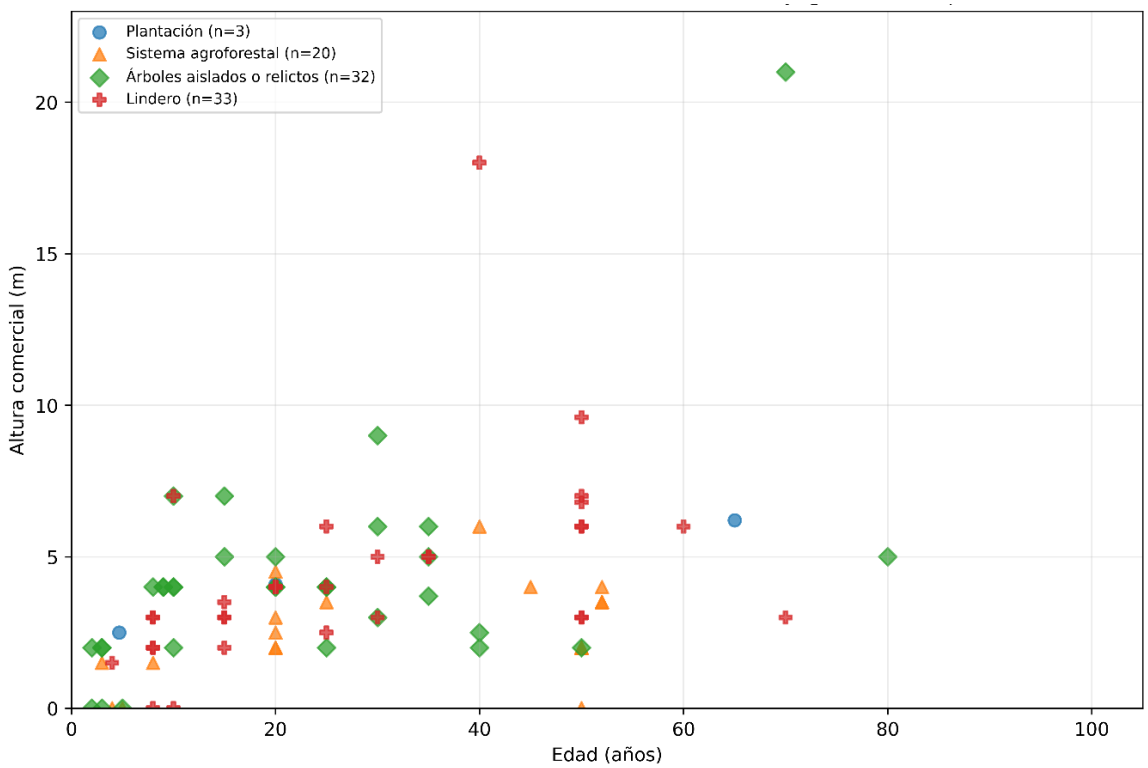
Con el propósito de generar una síntesis nacional del desarrollo de la altura comercial de *J. neotropica*, la información disponible fue integrada y sometida al mismo

proceso de certificación de calidad aplicado para la altura total dentro de la Base Nacional Dasométrica Integrada de *Juglans neotropica* (BNDI-JN, versión 3). La auditoría comprendió la verificación de la consistencia entre la edad y la altura comercial, la revisión de la coherencia biológica entre la altura comercial y la altura total, la identificación de registros duplicados y la depuración de valores inconsistentes. De los 264 registros incorporados en la base maestra, 93 disponían de información sobre altura comercial, de los cuales **88 registros cumplieron los criterios de calidad establecidos** para el análisis. Se excluyeron registros sin edad conocida, un caso en el que la altura comercial superaba a la altura total y un registro asociado a una altura total biológicamente inconsistente.

La relación entre la edad y la altura comercial de los registros validados se presenta en la Figura 12.5, que constituye la primera cronosecuencia nacional construida para esta variable a partir de una base de datos integrada y auditada.

Figura 12.5

Cronosecuencia nacional de la altura comercial de Juglans neotropica en Ecuador



Nota. La figura integra 88 registros validados de la Base Nacional Dasométrica Integrada de *J. neotropica* (BNDI-JN, versión 3). Cada punto representa una observación independiente correspondiente a árboles individuales, promedios de rodales o registros publicados previamente auditados. Además, la figura representa una cronosecuencia nacional y no una curva de crecimiento obtenida mediante seguimiento longitudinal de una misma población.

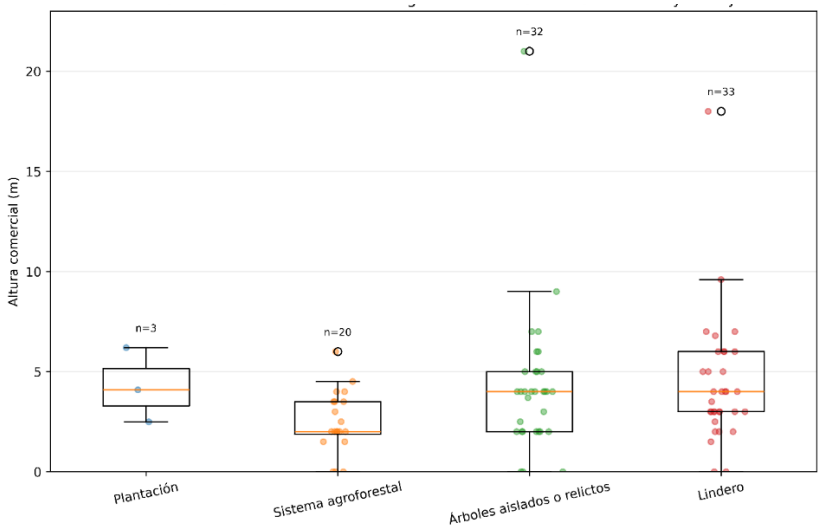
La cronosecuencia evidencia una tendencia general de incremento de la altura comercial conforme aumenta la edad de los árboles; sin embargo, la dispersión de los registros demuestra que esta variable presenta una variabilidad considerable incluso entre individuos de edades semejantes. A diferencia de la altura total, cuyo comportamiento está determinado principalmente por el crecimiento fisiológico de la especie, la altura comercial responde de manera más directa a la interacción entre la calidad del sitio, la competencia por la luz, la arquitectura del árbol y las intervenciones silviculturales realizadas durante las primeras etapas del desarrollo. En consecuencia, árboles con edades similares pueden presentar diferencias importantes en la longitud del fuste aprovechable.

Los mayores valores registrados corresponden a individuos establecidos en **Peñaherrera (Imbabura)** y **Monte Olivo (Carchi)**, donde se documentaron alturas comerciales de hasta **21,0 m** y **18,0 m**, respectivamente. Estos registros representan individuos excepcionales que fueron conservados en el análisis por cumplir los criterios de consistencia biológica y documental, constituyendo referencias del potencial de desarrollo del fuste bajo condiciones particularmente favorables. Por el contrario, los valores más bajos corresponden principalmente a árboles jóvenes en proceso de establecimiento, donde la formación del fuste comercial aún es incipiente.

Aunque la cronosecuencia permite comprender el desarrollo temporal de la altura comercial, resulta igualmente importante analizar su comportamiento entre los diferentes sistemas de establecimiento y manejo evaluados en Ecuador. Esta comparación se presenta en la Figura 12.6.

Figura 12.6

Distribución de la altura comercial de Juglans neotropica según el sistema de establecimiento y manejo en Ecuador



Nota. Cada punto representa un registro independiente incorporado a la Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN, versión 3). La línea central corresponde a la mediana, la caja representa el rango intercuartílico y los bigotes muestran la variabilidad de los datos. El tamaño de muestra (*n*) se presenta para cada categoría de establecimiento y manejo.

La comparación entre sistemas muestra que la mayor parte de la información disponible proviene de **linderos (n = 33)**, **árboles aislados o relictos (n = 32)** y **sistemas agroforestales (n = 20)**, mientras que las plantaciones continúan estando representadas por un número reducido de registros (**n = 3**). Esta distribución refleja la importante incorporación de datos originales obtenidos mediante el inventario nacional y el Programa *Juglans*, ampliando significativamente la información disponible respecto a las síntesis previas basadas exclusivamente en estudios publicados. Asimismo, la amplia dispersión observada dentro de cada sistema confirma que el tipo de establecimiento constituye únicamente uno de los factores que condicionan el desarrollo del fuste comercial.

Los estadísticos descriptivos obtenidos para las diferentes clases de edad se presentan en la Tabla 12.3, la cual resume cuantitativamente el comportamiento de la altura comercial en la base nacional auditada.

Tabla 12.3

Estadísticos descriptivos de la altura comercial de Juglans neotropica según clases de edad en Ecuador

Clase de edad	n	Mínimo (m)	Media (m)	Máximo (m)	DE (m)	CV (%)	Localidad con mayor valor
0–5	11	0,00	1,05	2,50	1,04	99,05	Estación Experimental Tunshi, Chimborazo
>5–15	21	0,00	3,38	7,00	1,98	58,58	San Francisco, Imbabura
>15–30	25	2,00	3,96	9,00	1,51	38,18	Jijón y Caamaño, Carchi
>30–60	27	0,00	4,65	18,00	3,40	73,09	Monte Olivo, Carchi
>60–100	4	3,00	8,80	21,00	8,24	93,63	Peñaherrera, Imbabura

Los estadísticos descriptivos muestran un incremento progresivo de la altura comercial media desde **1,05 m** durante los primeros cinco años hasta **8,80 m** en árboles con edades comprendidas entre 60 y 100 años. No obstante, la variabilidad permanece elevada en prácticamente todas las clases de edad, con coeficientes de variación entre **38,18 %** y **99,05 %**, reflejando la marcada influencia de las condiciones ambientales y del manejo silvicultural sobre la formación del fuste. La mayor estabilidad relativa se observa entre los **15 y 30 años**, etapa en la que el crecimiento del fuste presenta la menor variabilidad registrada en la base analítica.

Desde una perspectiva ecológica, el incremento de la altura comercial está estrechamente relacionado con la capacidad de los árboles para mantener un eje principal dominante y favorecer la autopoda natural de las ramas inferiores como respuesta a la competencia por la luz. Sin embargo, la expresión de este proceso depende en gran medida de las condiciones del sitio y de la historia de manejo de cada individuo. En consecuencia, árboles de edades similares pueden desarrollar longitudes de fuste muy diferentes aun dentro de una misma región.

Desde el punto de vista silvicultural, la altura comercial constituye uno de los mejores indicadores del potencial para la producción de madera de calidad. La aplicación oportuna de podas de formación, el control de la competencia y la selección adecuada del espaciamiento inicial favorecen el desarrollo de fustes largos, rectos y con menor presencia de ramas, incrementando el rendimiento potencial de trozas de alto valor comercial. Estos resultados adquieren especial relevancia porque proporcionan la primera referencia nacional basada en una base de datos integrada y auditada para evaluar el desarrollo del fuste comercial de *J. neotropica* en Ecuador.

Los patrones observados en la Base Nacional Dasométrica Integrada de *Juglans neotropica* (BNDI-JN) son consistentes con los principios silviculturales descritos por Galloway (1993), Smith et al. (1997) y Evans (2009), quienes señalan que la longitud del fuste comercial depende no solamente de la edad del árbol, sino principalmente de la interacción entre la calidad del sitio, la competencia por la luz, la autopoda natural y las prácticas de manejo aplicadas durante las primeras etapas del desarrollo del rodal. En consecuencia, las diferencias observadas entre árboles de edades semejantes confirman que la formación del fuste comercial responde tanto a las condiciones ecológicas como a las intervenciones silviculturales, particularmente al espaciamiento inicial, las podas de formación y el control de la competencia. En este contexto, la síntesis nacional desarrollada para *J. neotropica* constituye la primera referencia cuantitativa integrada sobre el desarrollo de la altura comercial de la especie en Ecuador y proporciona una base científica para orientar futuras investigaciones sobre calidad del fuste, productividad maderable y manejo silvicultural.

Finalmente, aunque la disponibilidad de información sobre altura comercial aumentó de manera sustancial respecto a las síntesis previamente publicadas, esta variable continúa siendo registrada con menor frecuencia que la altura total y el diámetro normal. Por ello, su incorporación sistemática en inventarios forestales, ensayos silviculturales y parcelas permanentes de monitoreo constituye una prioridad para fortalecer los modelos nacionales de productividad. En el siguiente apartado, el análisis del volumen comercial y del **factor de forma** permitirá integrar la altura comercial con el diámetro normal para estimar de manera más precisa el rendimiento maderable de la especie y mejorar las bases técnicas para su manejo silvicultural en Ecuador.

12.2.3 Desarrollo del diámetro normal: crecimiento radial e implicaciones para el manejo forestal

El diámetro a la altura del pecho (DAP), medido convencionalmente a 1,30 m sobre la superficie del suelo, constituye una de las variables dasométricas fundamentales para evaluar el crecimiento radial de los árboles. Su importancia radica en que sintetiza la respuesta del árbol a las condiciones del sitio y al manejo silvicultural, además de constituir la base para estimar el área basal, el volumen comercial, la biomasa aérea y las reservas de carbono. En consecuencia, el DAP representa uno de los indicadores más utilizados en inventarios forestales, estudios de crecimiento y planificación del manejo forestal. Asimismo, su evolución refleja la capacidad del árbol para transformar los

recursos disponibles en incremento radial, por lo que constituye una variable clave para evaluar la productividad de plantaciones, sistemas agroforestales y bosques naturales.

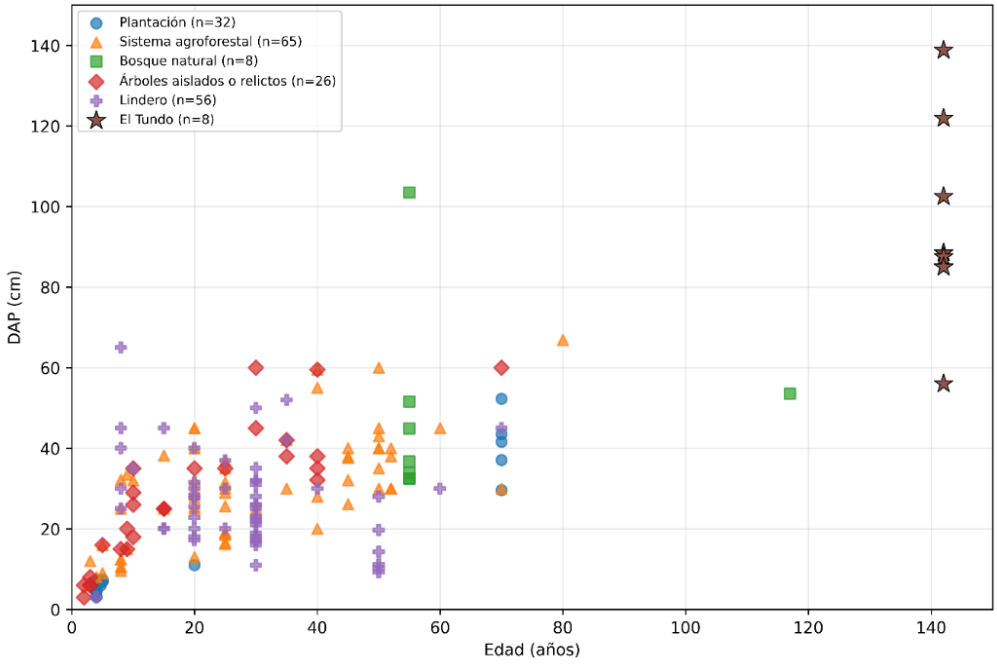
A diferencia de la altura total, cuyo crecimiento está asociado principalmente con la competencia por la luz durante las primeras etapas del desarrollo del rodal, el crecimiento diamétrico responde con mayor sensibilidad a la disponibilidad de espacio para el desarrollo de la copa, la fertilidad del suelo, el suministro de agua y nutrientes y las intervenciones silviculturales, particularmente el espaciamiento inicial, las podas y los raleos. Por ello, el seguimiento periódico del DAP constituye una herramienta indispensable para evaluar la respuesta de los rodales al manejo forestal y para definir el momento oportuno de las intervenciones silviculturales.

Con el propósito de generar una síntesis nacional del crecimiento diamétrico de *J. neotropica* en Ecuador, la información disponible fue integrada en la Base Nacional Dasométrica Integrada de *Juglans neotropica* (BNDI-JN, versión 3) y sometida a un proceso de certificación de calidad de los datos. La auditoría comprendió la verificación de la consistencia biológica de los registros, la identificación de duplicados entre las diferentes fuentes de información, la validación de la edad de los árboles y la revisión de la coherencia entre el diámetro, la altura y las demás variables dasométricas. Como resultado, de los **264 registros** incorporados en la base maestra, **218 disponían de información sobre DAP**, de los cuales **195 registros cumplieron los criterios de calidad establecidos** para el análisis. Los registros excluidos correspondieron principalmente a datos sin edad conocida, duplicados interbase o inconsistencias biológicas evidentes.

La relación entre la edad y el diámetro normal de los registros validados se presenta en la Figura 12.7, que constituye la primera cronosecuencia nacional del crecimiento diamétrico de *J. neotropica* elaborada a partir de una base de datos integrada y auditada.

Figura 12.7

Cronosecuencia nacional del diámetro a la altura del pecho (DAP) de *Juglans neotropica en Ecuador*



Nota. La figura integra 195 registros validados de la Base Nacional Dasométrica Integrada de *J. neotropica* (BNDI-JN, versión 3). Cada punto representa una observación independiente correspondiente a árboles individuales, rodales o registros publicados previamente auditados. La cronosecuencia representa una síntesis nacional del crecimiento diamétrico y no una curva de crecimiento obtenida mediante seguimiento longitudinal de una misma población.

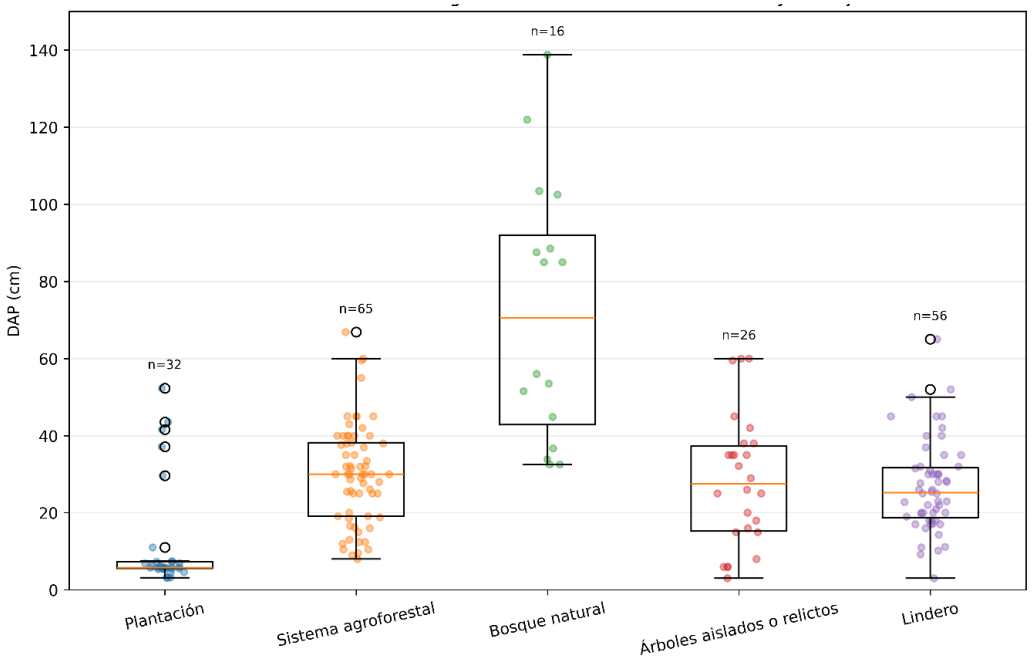
La cronosecuencia evidencia un incremento sostenido del diámetro conforme aumenta la edad de los árboles, aunque con una marcada dispersión entre individuos de edades similares. Los valores oscilan entre **3,0 cm** durante los primeros años de establecimiento y **138,78 cm** en árboles centenarios de la Reserva Natural El Tundo, lo que refleja la amplia variabilidad del crecimiento radial de la especie en diferentes condiciones ecológicas y de manejo. La presencia de individuos con diámetros excepcionalmente elevados en bosques naturales y árboles maduros amplía considerablemente el horizonte temporal de la síntesis nacional y permite contextualizar el crecimiento observado en plantaciones jóvenes.

En las primeras clases de edad el incremento diamétrico presenta una elevada variabilidad, asociada principalmente a diferencias en el establecimiento, la calidad del sitio y el manejo inicial. Conforme aumenta la edad, el DAP continúa incrementándose, aunque con trayectorias diferenciadas entre localidades. Los mayores diámetros observados corresponden a árboles establecidos en **Carigan (Loja)**, **El Ángel (Carchi)** y, especialmente, a la población de **El Tundo (Loja)**, que representa actualmente la mejor expresión documentada del crecimiento radial de la especie en Ecuador.

Con el fin de complementar la perspectiva temporal del crecimiento, la distribución del DAP entre los diferentes sistemas de establecimiento y manejo se resume en la Figura 12.8.

Figura 12.8

Distribución del diámetro a la altura del pecho (DAP) de Juglans neotropica según el sistema de establecimiento y manejo en Ecuador



Nota. Cada punto representa un registro independiente incorporado a la Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN, versión 3). La línea central corresponde a la mediana, la caja representa el rango intercuartílico y los bigotes muestran la variabilidad de los datos. El tamaño de muestra (*n*) se presenta para cada categoría de establecimiento y manejo.

La comparación entre sistemas muestra que la mayor parte de la información disponible corresponde a **sistemas agroforestales (n = 65)** y **linderos (n = 56)**, seguidos por **plantaciones (n = 32)**, **árboles aislados o relictos (n = 26)** y **bosques naturales (n = 16)**. Esta distribución refleja la importante incorporación de datos originales obtenidos mediante el Programa *Juglans* y el inventario nacional, ampliando de manera significativa la representatividad de la base de datos respecto a las síntesis previamente publicadas. La dispersión observada dentro de cada sistema confirma que el crecimiento diamétrico responde a una compleja interacción entre las condiciones ambientales, la densidad del rodal y las prácticas silviculturales.

Los estadísticos descriptivos obtenidos para las diferentes clases de edad se presentan en la Tabla 12.4, que resume cuantitativamente el comportamiento del crecimiento diamétrico en la base nacional auditada.

Tabla 12.4

Estadísticos descriptivos del diámetro normal de Juglans neotropica según clases de edad en Ecuador

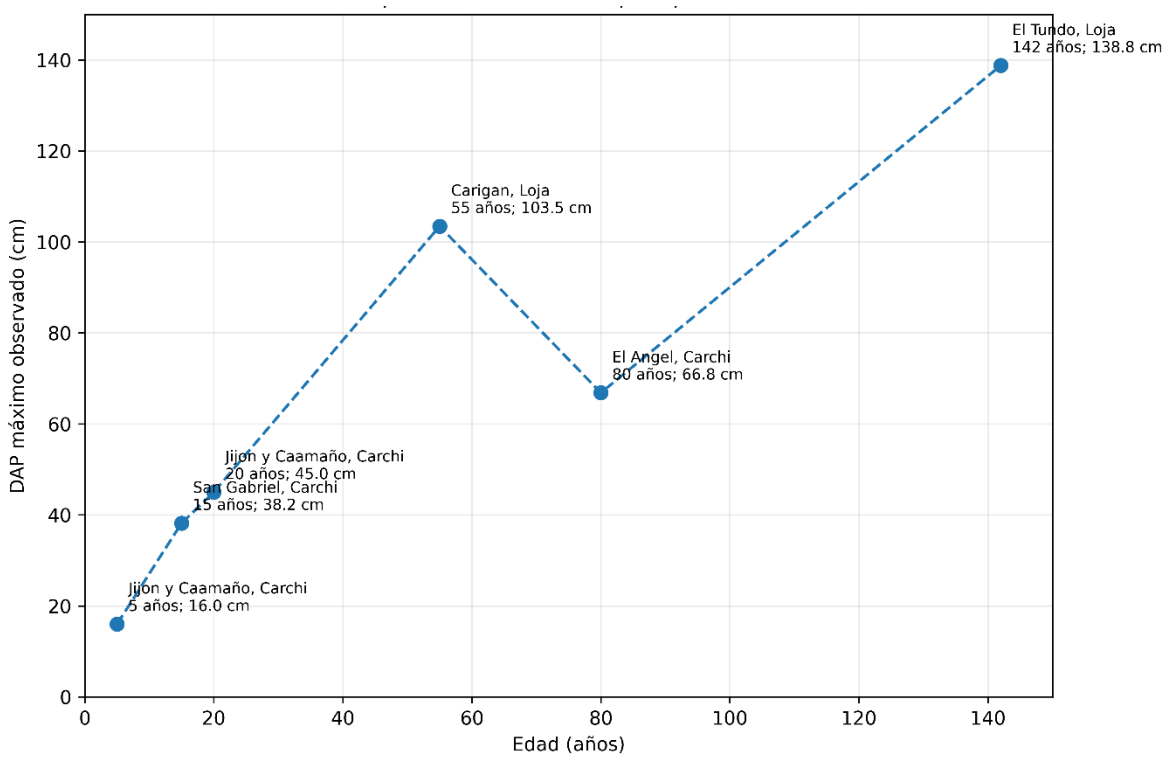
Clase de edad	n	Mínimo (cm)	Media (cm)	Máximo (cm)	DE (cm)	CV (%)	Localidad con mayor valor
0–5	37	3,00	6,48	16,00	2,88	44,53	Jijón y Caamaño, Carchi
>5–15	30	9,55	26,30	65,00	12,54	47,68	Cayambe, Pichincha
>15–30	64	11,00	27,13	60,00	9,76	35,99	Los Andes, Carchi
>30–60	46	9,23	37,20	103,45	15,63	42,03	Carigan, Loja
>60–100	9	29,60	45,10	66,84	12,72	28,19	El Ángel, Carchi
>100	9	53,51	90,97	138,78	27,59	30,33	El Tundo, Loja

Los estadísticos descriptivos muestran un incremento progresivo del diámetro medio desde **6,48 cm** en árboles de hasta cinco años hasta **90,97 cm** en individuos con edades superiores a cien años. La variabilidad permanece elevada durante todo el ciclo de desarrollo, con coeficientes de variación comprendidos entre **28,19 %** y **47,68 %**, lo que evidencia la influencia conjunta de la calidad del sitio, la disponibilidad de recursos, la competencia y el manejo silvicultural sobre el crecimiento radial. La menor variabilidad relativa se registró en los árboles de **60 a 100 años**, mientras que las primeras etapas de desarrollo presentaron una mayor heterogeneidad, característica de los procesos de establecimiento y diferenciación inicial de los rodales.

Además de describir el crecimiento diamétrico, la BNDI-JN permitió identificar, árboles candidatos para selección fenotípica. Estos corresponden a los individuos que presentan los mayores valores de DAP dentro de cada clase de edad y cuya información de edad posee niveles altos de confiabilidad. Su identificación constituye un criterio operativo para priorizar árboles de interés en futuros programas de evaluación genética, conservación de recursos forestales y establecimiento de fuentes semilleras, sin implicar superioridad genética demostrada demostrada. La síntesis de estos individuos se presenta en la Figura 12.9.

Figura 12.9

Árboles candidatos para selección fenotípica por crecimiento diamétrico observado de Juglans neotropica en Ecuador



Nota. La figura identifica el mayor DAP observado en cada clase de edad entre registros con alta confiabilidad en la estimación de la edad. Los individuos representan candidatos preliminares para selección fenotípica y su priorización definitiva requerirá una evaluación integral mediante el futuro Índice de Prioridad Fenotípica (IPF), incorporando variables dasométricas, calidad del fuste, arquitectura, estado sanitario y características reproductivas.

Desde la perspectiva silvicultural, el DAP constituye una de las variables más sensibles para evaluar la productividad de los rodales y orientar las decisiones de manejo. Mientras la altura expresa principalmente la ocupación del dosel, el crecimiento diamétrico refleja la acumulación de biomasa y la respuesta del árbol a la disponibilidad de recursos durante todo su ciclo de vida. En consecuencia, el monitoreo conjunto del DAP, la altura dominante y el desarrollo de las copas permite apoyar la determinación de la oportunidad e intensidad de los raleos y otras intervenciones destinadas a favorecer la producción de fustes de mayor diámetro y trozas de alto valor comercial.

Los patrones de crecimiento diamétrico observados en la Base Nacional Dasométrica Integrada de *Juglans neotropica* (BNDI-JN) concuerdan con los principios clásicos de la mensura y la silvicultura forestal descritos por Daniel et al. (1979), Avery y Burkhart (2015), Galloway (1993) y Weiskittel et al. (2011), quienes reconocen al diámetro normal como el indicador más robusto del crecimiento acumulado de los árboles y la variable fundamental para estimar el área basal, el volumen, la biomasa y el

rendimiento forestal. Asimismo, la amplia variabilidad observada entre individuos de edades semejantes confirma que el crecimiento radial responde no solo al tiempo transcurrido desde el establecimiento, sino también a la interacción entre la calidad del sitio, la disponibilidad de recursos, la competencia, el origen genético y las prácticas silviculturales aplicadas durante el desarrollo del rodal. En este contexto, la cronosecuencia nacional desarrollada para *J. neotropica* constituye la primera referencia integrada del crecimiento diamétrico de la especie en Ecuador y proporciona una base científica para futuras investigaciones sobre productividad, calidad de sitio, modelación del crecimiento y selección fenotípica de individuos sobresalientes.

Finalmente, la consolidación de la BNDI-JN permitió ampliar de manera sustancial el conocimiento sobre el crecimiento diamétrico de *J. neotropica* en Ecuador y sentó las bases para una nueva etapa de investigación orientada a la identificación de individuos sobresalientes mediante el **Índice de Prioridad Fenotípica (IPF)**. La integración de esta información con el análisis del área basal, el volumen y el factor de forma, desarrollados en los apartados siguientes, permitirá evaluar de manera integral la productividad forestal de la especie y fortalecer las bases científicas para su manejo, conservación y mejoramiento genético.

12.2.4 Desarrollo del área basal individual: crecimiento radial y estructura del árbol

A escala individual, el área basal expresa el tamaño de la sección transversal del fuste y constituye una transformación cuadrática del DAP. A escala de rodal, la suma del área basal de los individuos por unidad de superficie ($m^2\ ha^{-1}$) constituye un indicador de densidad, ocupación del sitio y competencia, ampliamente utilizado para orientar intervenciones silviculturales, respondiendo a los modelos de relaciones tamaño-densidad descritos por Long (1995). En este apartado, debido a las características de la información disponible, el análisis se concentra en el área basal individual.

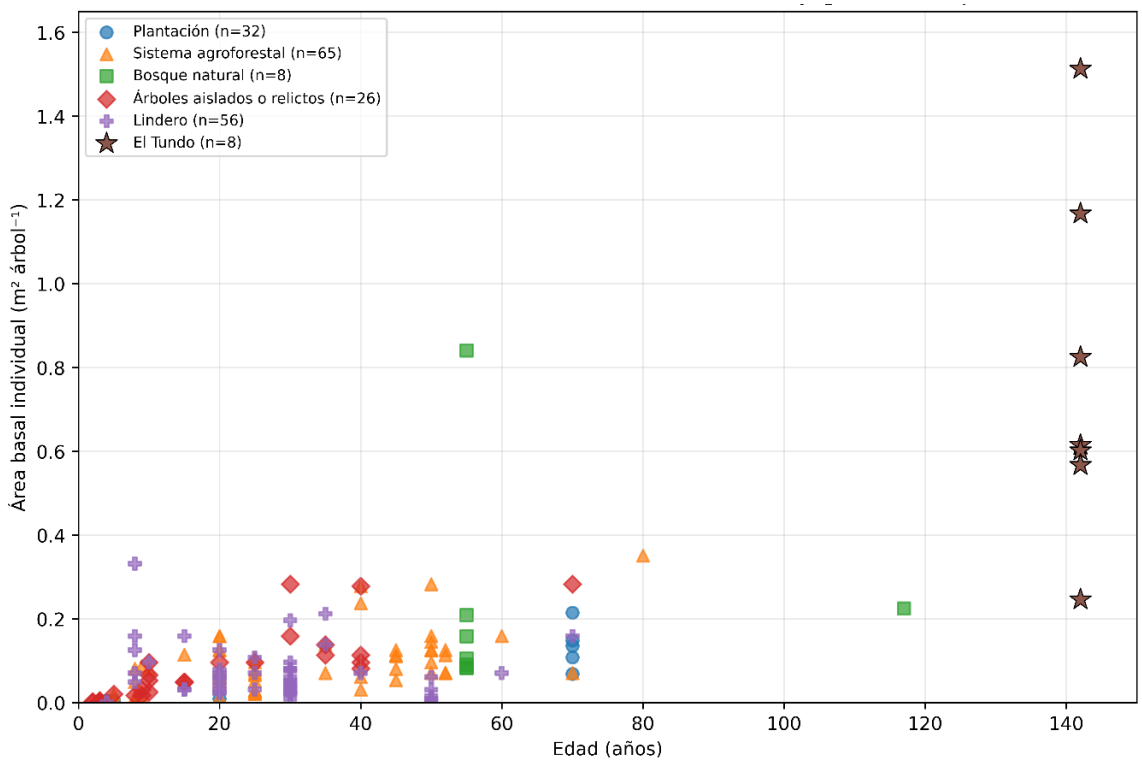
A diferencia del diámetro normal, que describe el crecimiento de cada árbol de manera individual, el área basal integra dicho crecimiento mediante una relación cuadrática, de modo que pequeños incrementos en el diámetro producen aumentos proporcionalmente mayores en la superficie ocupada por el fuste. Esta característica convierte al área basal en una variable particularmente sensible para interpretar la ocupación del sitio, la competencia entre individuos y la evolución estructural de los rodales durante su desarrollo.

Con el propósito de elaborar la primera síntesis nacional del crecimiento en área basal de *J. neotropica*, todos los registros disponibles fueron sometidos al mismo proceso de auditoría, depuración y armonización metodológica aplicado en las variables anteriores. Únicamente se incorporaron aquellos registros que superaron la auditoría del diámetro normal y presentaron edades verificadas. Posteriormente, el área basal individual fue recalculada de manera homogénea para todos los registros mediante una única expresión matemática, evitando diferencias asociadas a metodologías de cálculo empleadas en estudios individuales y garantizando la comparabilidad de la Base Nacional Dasométrica Integrada de *Juglans neotropica* (BNDI-JN, versión 3). Como resultado de este proceso se obtuvieron **195 registros válidos** distribuidos en plantaciones, sistemas agroforestales, bosques naturales, árboles aislados o relictos y linderos.

La Figura 12.10 presenta la cronosecuencia nacional del área basal individual en función de la edad, integrando registros independientes distribuidos a lo largo del desarrollo de la especie. Complementariamente, la Figura 12.11 compara la distribución del área basal entre los principales sistemas de establecimiento y manejo evaluados en Ecuador, mientras que la Tabla 12.4 resume los estadísticos descriptivos obtenidos para cada clase de edad a partir de la BNDI-JN.

Figura 12.10

Cronosecuencia nacional del área basal individual de Juglans neotropica en Ecuador



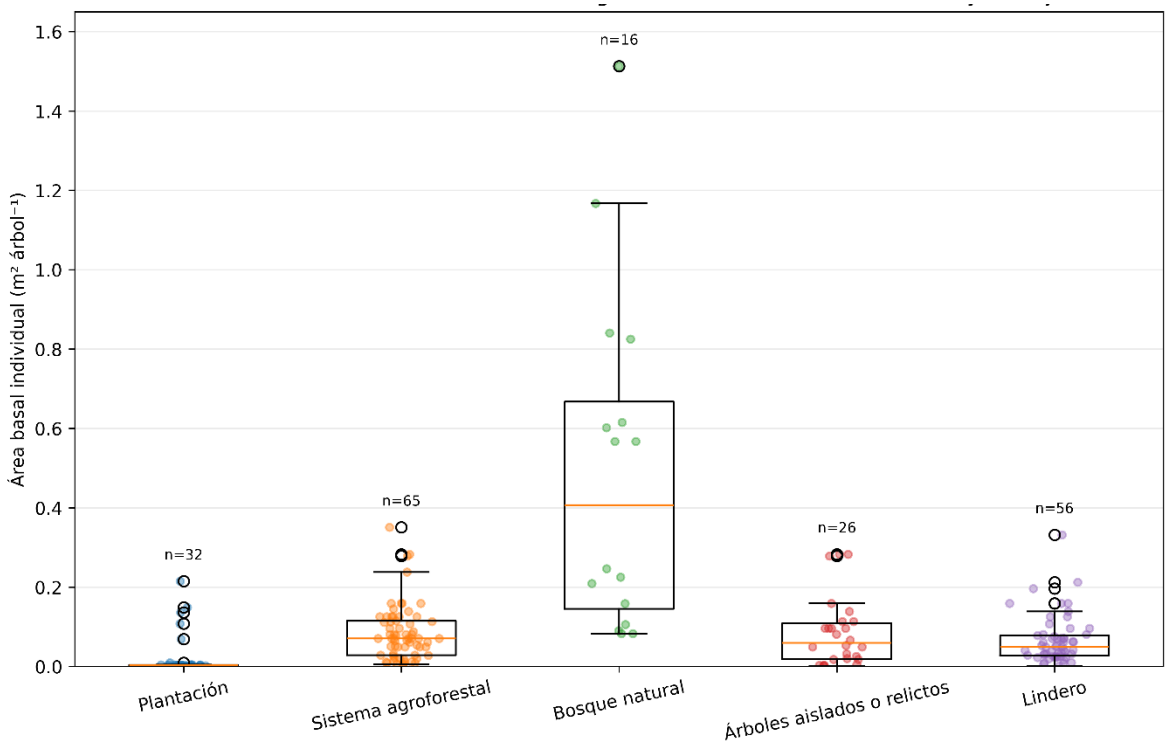
Nota. La figura integra 195 registros validados procedentes de la Base Nacional Dasométrica Integrada de *J. neotropica* (BNDI-JN, versión 3). El área basal individual fue recalculada homogéneamente a partir del DAP mediante una única ecuación, por lo que representa una cronosecuencia nacional y no una curva de crecimiento obtenida mediante el seguimiento longitudinal de una misma población.

La cronosecuencia evidencia un incremento progresivo del área basal conforme aumenta la edad de los árboles, aunque la magnitud del crecimiento presenta una marcada variabilidad entre localidades y sistemas de establecimiento. Durante los primeros cinco años predominan valores inferiores a 0,02 m² árbol⁻¹, mientras que en rodales mayores de un siglo se registran áreas basales superiores a 1,50 m² árbol⁻¹. Este comportamiento refleja la naturaleza cuadrática de la relación entre el diámetro y el área basal, de manera que incrementos relativamente pequeños del DAP producen aumentos considerablemente mayores en la superficie ocupada por el fuste. La amplia dispersión observada confirma además que el crecimiento radial acumulado depende no únicamente de la edad, sino también de la calidad del sitio, la disponibilidad de recursos, la competencia entre

individuos, el origen genético y las prácticas silviculturales implementadas durante el desarrollo del rodal.

Figura 12.11

Distribución del área basal individual de Juglans neotropica según el sistema de establecimiento y manejo en Ecuador



Nota. Cada punto representa un registro independiente de la BNDI-JN. La barra horizontal corresponde a la mediana de cada categoría y el tamaño de muestra (n) indica el número de registros incorporados en cada sistema de establecimiento y manejo.

La comparación entre sistemas evidencia una amplia variabilidad del área basal individual en todos los ambientes evaluados. Los mayores valores corresponden principalmente a bosques naturales, árboles relictos y algunos linderos con individuos de gran diámetro, mientras que los menores valores se concentran en plantaciones jóvenes y ensayos experimentales. En conjunto, esta distribución refleja las diferencias en edad, densidad, competencia y manejo silvicultural presentes entre los distintos sistemas donde actualmente se desarrolla *J. neotropica* en Ecuador.

Tabla 12.5

Estadísticos descriptivos del área basal individual de Juglans neotropica según clases de edad en Ecuador

Clase de edad	n	Mínimo (m² árbol⁻¹)	Media (m² árbol⁻¹)	Máximo (m² árbol⁻¹)	DE (m² árbol⁻¹)	CV (%)	Localidad con mayor valor
0–5	37	0,0007	0,0039	0,0201	0,0043	110,57	Jijón y Caamaño, Carchi
>5–15	30	0,0072	0,0663	0,3318	0,0660	99,58	Cayambe, Pichincha
>15–30	64	0,0095	0,0652	0,2827	0,0492	75,46	Los Andes, Carchi
>30–60	46	0,0067	0,1274	0,8405	0,1272	99,80	Carigan, Loja
>60–100	9	0,0688	0,1711	0,3509	0,0956	55,88	El Ángel, Carchi
>100	9	0,2249	0,7031	1,5127	0,4150	59,02	El Tundo, Loja

La Tabla 12.5 confirma un incremento sostenido del área basal conforme aumenta la edad de los árboles. La media pasó de aproximadamente 0,0039 m² árbol⁻¹ en la clase de 0–5 años a 0,7031 m² árbol⁻¹ en árboles con edades superiores a 100 años, alcanzando un valor máximo de 1,5127 m² árbol⁻¹ en la Reserva Natural El Tundo. Los coeficientes de variación, comprendidos entre 55,88 % y 110,57 %, evidencian una elevada heterogeneidad entre individuos y localidades, característica esperable en una base nacional que integra información procedente de diferentes ambientes, sistemas de establecimiento y condiciones de manejo.

Los mayores valores registrados en localidades como **El Tundo**, **Carigan**, **El Ángel**, **Los Andes** y **Cayambe** constituyen referencias de gran interés para futuras investigaciones sobre productividad forestal y calidad de sitio. Sin embargo, estos resultados no deben interpretarse como valores normativos del crecimiento de la especie, sino como expresiones del potencial alcanzado bajo condiciones ambientales y silviculturales particulares.

Los patrones observados en la BNDI-JN concuerdan con los principios clásicos de la mensura y la silvicultura forestal descritos por Galloway (1993), Avery y Burkhart (2015) y Daniel et al. (1979), quienes reconocen al área basal como uno de los indicadores más confiables para evaluar la ocupación efectiva del sitio, la competencia entre árboles y la productividad potencial de los rodales. De igual manera, la elevada variabilidad observada entre árboles de edades semejantes confirma que el desarrollo del área basal depende no solo del crecimiento diamétrico, sino también de la interacción entre la calidad del sitio, el régimen de competencia, la disponibilidad de recursos, el origen genético y las prácticas silviculturales aplicadas durante el desarrollo del rodal. En este contexto, la síntesis nacional desarrollada para *J. neotropica* constituye la primera referencia integrada sobre el comportamiento del área basal de la especie en Ecuador y proporciona una base científica para futuras investigaciones sobre productividad, dinámica de rodales y manejo forestal.

Finalmente, aunque la construcción de la BNDI-JN permitió ampliar sustancialmente el conocimiento sobre el crecimiento en área basal de *J. neotropica*, la

información disponible sobre **área basal por hectárea** continúa siendo limitada debido a la escasez de estudios que reportan simultáneamente la densidad del rodal y el espaciamiento de establecimiento. En consecuencia, la incorporación sistemática de estas variables en inventarios forestales, parcelas permanentes y ensayos silviculturales constituye una prioridad para fortalecer los modelos nacionales de competencia, productividad y manejo. En el siguiente apartado, el análisis del **volumen total y comercial** integrará el diámetro, la altura y, posteriormente, el factor de forma para estimar con mayor precisión el rendimiento maderable de la especie y consolidar las bases técnicas para su manejo silvicultural en Ecuador.

12.2.5. Factor de forma de *J. neotropica* en Ecuador: variabilidad estructural e implicaciones para la estimación del volumen

El factor de forma (f), denominado también coeficiente mórfico o factor volumétrico de forma, representa la relación entre el volumen real del fuste y el volumen del cilindro teórico que posee la misma área basal y altura. Este parámetro expresa el grado de ahusamiento del tronco y constituye uno de los componentes fundamentales para la estimación del volumen comercial, la biomasa aérea y las reservas de carbono. Cuanto más próximo a la unidad sea su valor, menor será el ahusamiento del fuste y mayor la eficiencia volumétrica del árbol.

En Ecuador, la estimación oficial del volumen de árboles en programas de manejo forestal se encuentra regulada por el **Acuerdo Ministerial N.º 125**, mediante el cual se expiden las *Normas para el Manejo Forestal Sostenible de los Bosques* (MAE, 2014). Dicho instrumento establece la metodología oficial para el cálculo del volumen maderable y, en la práctica forestal nacional, se ha utilizado tradicionalmente un factor de forma general de **0,70** para especies latifoliadas.

Sin embargo, la utilización de un único coeficiente para especies con arquitecturas fustales diferentes puede introducir errores sistemáticos en la estimación del volumen. Con el propósito de evaluar esta situación en *J. neotropica*, se integró la totalidad de la evidencia experimental disponible en Ecuador, obtenida mediante investigaciones desarrolladas en diferentes condiciones ecológicas y de manejo. Como resultado, se generó la primera síntesis nacional del factor de forma para la especie.

La base analítica comprendió **146 árboles**, distribuidos en tres condiciones contrastantes de crecimiento: bosque natural (Reserva Natural El Tundo, Loja), plantación forestal adulta (Loja) y arbolado disperso–cortina rompevientos (Campus Yuyucocha, Imbabura). En conjunto, estas investigaciones representan actualmente la mayor evidencia empírica disponible para determinar el factor de forma de *J. neotropica* en Ecuador.

Las características metodológicas de los estudios incorporados se resumen en la Tabla 12.6.

Tabla 12.6

Síntesis nacional de los estudios utilizados para determinar el factor de forma de Juglans neotropica en Ecuador

Provincia	Ecosistema	n	Método de cubicación	Factor de forma
Loja	Bosque natural (El Tundo)	42	Smalian	0,83
Loja	Plantación (~50 años)	25	Volumen real/Cilindro	0,86
Imbabura	Árboles dispersos y cortina rompevientos	79	Smalian	0,92
Imbabura	Árboles dispersos y cortina rompevientos	79	Newton	0,94

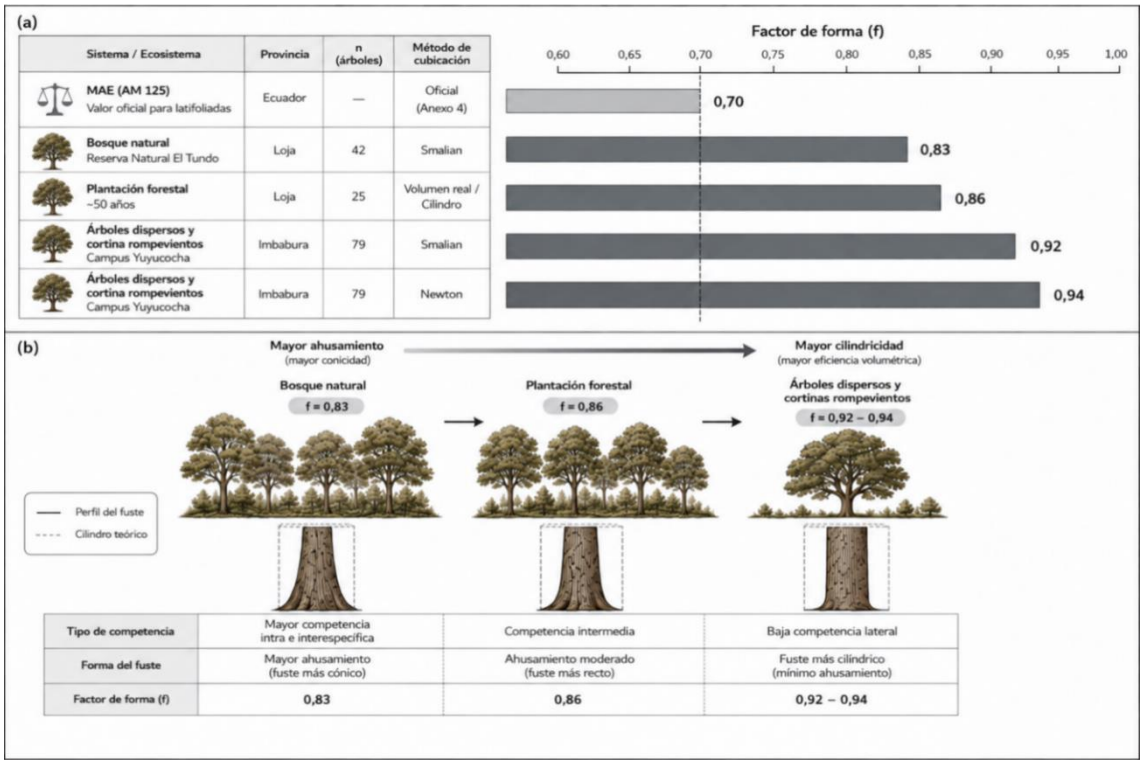
Nota. Los valores de Smalian y Newton corresponden a la misma muestra de 79 árboles. Total analizado: 146 individuos.

Los resultados muestran una variación consistente del factor de forma entre los diferentes sistemas evaluados. En el bosque natural de la Reserva Natural El Tundo se obtuvo un valor promedio de **0,83**, mientras que en la plantación forestal evaluada por Palacios et al. (2017) el factor promedio fue **0,86**. Los mayores valores correspondieron al arbolado disperso y la cortina rompevientos del Campus Yuyucocha, donde se registraron factores de **0,92** mediante la fórmula de Smalian y **0,94** mediante la fórmula de Newton (Carvajal et al., 2023b).

Con el propósito de integrar la evidencia experimental y facilitar su interpretación, la Figura 12.12 reúne en una sola composición gráfica los principales resultados obtenidos. El **panel (a)** compara los factores de forma determinados para *J. neotropica* con el coeficiente general de **0,70** utilizado tradicionalmente para especies latifoliadas en Ecuador, mientras que el **panel (b)** sintetiza conceptualmente el gradiente de eficiencia volumétrica del fuste observado entre los diferentes sistemas de establecimiento y manejo.

Figura 12.12

Factor de forma de Juglans neotropica en Ecuador y gradiente conceptual de la eficiencia volumétrica del fuste según el tipo de ecosistema y manejo



Nota. **(a)** Comparación entre el factor de forma general utilizado tradicionalmente para especies latifoliadas en Ecuador (Acuerdo Ministerial N.º 125) y los factores de forma obtenidos experimentalmente para *J. neotropica* en bosque natural (Quezada, 2023), plantación forestal (Palacios et al., 2017) y arbolado disperso–cortina rompevientos (López, 2023). Se incluye el número de árboles evaluados y el procedimiento de cubicación empleado en cada estudio. **(b)** Representación conceptual del gradiente de eficiencia volumétrica del fuste desde bosques naturales hasta árboles dispersos y cortinas rompevientos. Las ilustraciones corresponden a representaciones esquemáticas basadas en la arquitectura de *J. neotropica* y en la textura característica de la corteza del nogal andino, elaboradas con fines de síntesis científica.

Los factores de forma obtenidos muestran diferencias entre las condiciones de crecimiento evaluadas, con valores de 0,83 en bosque natural, 0,86 en plantación y 0,92–0,94 en árboles dispersos y cortina rompevientos. Estas diferencias son compatibles con variaciones en la arquitectura y conformación de los fustes; sin embargo, debido a que los estudios corresponden a localidades, edades, condiciones de crecimiento y diseños metodológicos diferentes, no permiten atribuir causalmente la variación del factor de forma a un único factor, como la competencia lateral.

Bajo iguales valores de área basal y altura, la utilización de un factor de forma de 0,70 produciría estimaciones volumétricas inferiores a las obtenidas con los factores determinados en los estudios analizados. Por ello, la selección del factor debe considerar

la condición de crecimiento y la similitud con los sistemas en los que fue determinado experimentalmente.

Con base en la evidencia integrada en esta investigación, se proponen los factores de forma que se presentan en la Tabla 12.7 como referencias técnicas para la estimación del volumen de *J. neotropica* en Ecuador.

Tabla 12.7

Factores de forma de referencia para la estimación del volumen de Juglans neotropica según las condiciones de crecimiento evaluadas en Ecuador

Condición de crecimiento	Factor de forma de referencia
Bosque natural	**0,83**
Plantaciones forestales	**0,86**
Árboles dispersos y cortinas rompevientos	**0,92–0,94**

Nota. Estos factores corresponden a las condiciones de crecimiento evaluadas en los estudios analizados y constituyen referencias técnicas para *J. neotropica*. Su aplicación deberá considerar la similitud entre el rodal inventariado y las condiciones bajo las cuales fueron obtenidos.

Bajo iguales valores de área basal y altura, la utilización de un factor de forma de 0,70 produciría estimaciones volumétricas inferiores a las obtenidas con los factores determinados en los estudios analizados. Por ello, la selección del factor debe considerar la condición de crecimiento y la similitud con los sistemas en los que fue determinado experimentalmente.

12.2.6 Crecimiento volumétrico y productividad maderable de *J. neotropica*

El crecimiento volumétrico constituye la expresión más integradora del desarrollo de un árbol, al combinar simultáneamente el crecimiento diamétrico, la altura y la forma del fuste en una única variable de productividad. Desde la perspectiva silvicultural, el volumen representa la base para estimar el rendimiento maderable, evaluar la eficiencia del manejo forestal y proyectar la producción futura de los rodales. En *J. neotropica*, la disponibilidad de información volumétrica ha sido históricamente limitada y metodológicamente heterogénea, debido al empleo de diferentes procedimientos de cubicación, factores de forma y niveles de organización de los datos, dificultando la comparación entre estudios realizados en distintas regiones del Ecuador.

Con el propósito de superar estas limitaciones, en este apartado se desarrolló una metodología uniforme para la construcción de la **Base Nacional Volumétrica de *Juglans neotropica* (BNV-JN)**, a partir de la cual se analiza el desarrollo del volumen total y del volumen comercial de la especie. Asimismo, se evalúa la relación entre ambas variables como indicador de la eficiencia estructural y del potencial de aprovechamiento del fuste, y finalmente se presentan las primeras tablas volumétricas nacionales para *J. neotropica*, concebidas como herramientas de apoyo para la estimación del rendimiento maderable y la planificación del manejo silvicultural en Ecuador.

12.2.6.1 Construcción de la Base Nacional Volumétrica de Juglans neotropica (BNV-JN)

Con el propósito de generar una base de información homogénea para el análisis del crecimiento volumétrico de *J. neotropica* en Ecuador, se construyó la **Base Nacional Volumétrica de *Juglans neotropica* (BNV-JN)** a partir de la **Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN)** desarrollada en los apartados precedentes y complementada con registros volumétricos procedentes de investigaciones nacionales previamente auditadas. La BNV-JN constituye una base analítica derivada, diseñada para integrar de manera uniforme la información volumétrica disponible de la especie mediante procesos de auditoría, armonización y, cuando fue necesario, el recálculo estandarizado de las variables dasométricas y volumétricas.

La construcción de la BNV-JN comprendió un proceso secuencial de auditoría, armonización y validación de registros. En una primera etapa se verificó la consistencia de las variables dasométricas provenientes de la BNDI-JN, comprobando la integridad de los registros de diámetro normal (DAP), altura total y altura comercial. Posteriormente, para aquellos registros que requerían estimación volumétrica, se calculó uniformemente el área basal individual a partir del diámetro normal mediante la siguiente expresión:

$$g = \pi \left(\frac{DAP}{200}\right)^2$$

donde:

g = área basal individual (m² árbol⁻¹)

DAP = diámetro a la altura del pecho (cm)

Para los sistemas agrosilvícolas sin un factor de forma determinado experimentalmente se utilizó provisionalmente f = 0,93, correspondiente al valor intermedio del intervalo obtenido en árboles dispersos y cortinas rompevientos de Yuyucocha. Estos registros fueron identificados en la BNV-JN-V2 como estimaciones basadas en un factor asumido por analogía estructural y, por tanto, presentan un nivel de evidencia diferente de los volúmenes obtenidos mediante cubicación directa o factores determinados experimentalmente.

Cuando las fuentes originales no reportaban volúmenes individuales, el volumen total y el volumen comercial fueron estimados uniformemente mediante las expresiones:

$$V_t = g \times H_t \times f$$
$$V_c = g \times H_c \times f$$

donde:

Vt = volumen total (m³ árbol⁻¹)

Vc = volumen comercial (m³ árbol⁻¹)

g = área basal individual (m² árbol⁻¹)

Ht = altura total (m)

Hc = altura comercial (m)

f = factor de forma

La BNV-JN integró dos tipos de información volumétrica: (i) registros con volúmenes individuales reportados directamente por las investigaciones originales y sometidos a procesos de auditoría y validación; y (ii) registros cuyos volúmenes fueron recalculados de manera uniforme a partir del diámetro normal, la altura y el factor de forma correspondiente. En ambos casos se conservó la trazabilidad de la información, registrando el origen de los datos, el método de estimación y el nivel de evidencia asociado a cada observación.

Como parte del proceso de control de calidad se verificó la coherencia interna entre todas las variables empleadas para la estimación volumétrica. Se identificaron registros incompletos, inconsistencias estructurales —como alturas comerciales superiores a la altura total— y posibles duplicaciones entre fuentes. En lugar de eliminar dichos registros de la base maestra, cada observación fue clasificada mediante variables de inclusión específicas para los análisis de volumen total, volumen comercial e Índice de Aprovechamiento del Fuste (IAF-JN), preservando así la integridad documental y la trazabilidad de la información.

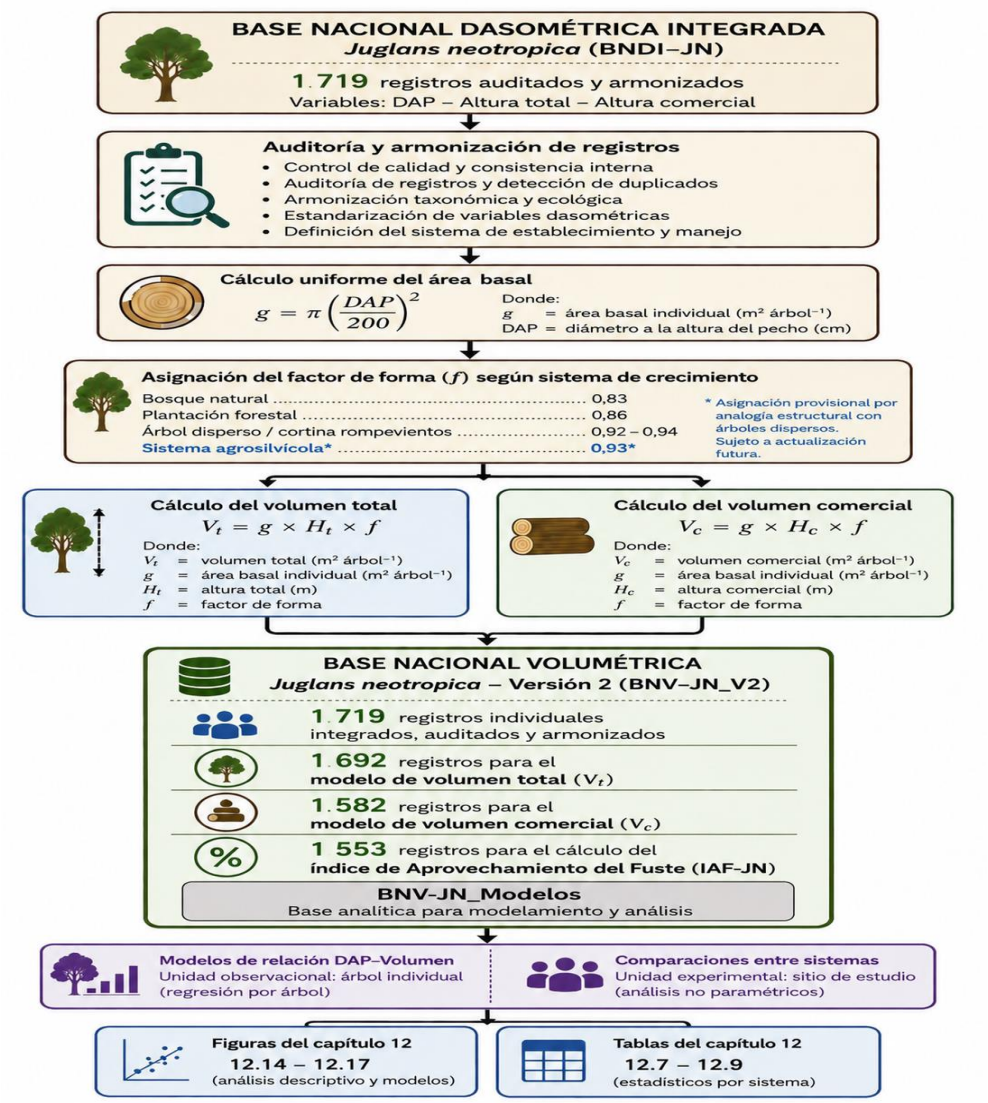
Como resultado del proceso de integración, auditoría y armonización, la **BNV-JN-V2** quedó conformada por **1 719 registros individuales**, procedentes de bosques naturales, plantaciones forestales, sistemas agrosilvícolas, sistemas silvopastoriles, sistemas lineales agroforestales, árboles aislados y arbolado urbano. De este conjunto, **1 692 registros** fueron aptos para los análisis de volumen total, **1 582** para volumen comercial y **1 553** para el cálculo del **Índice de Aprovechamiento del Fuste de *Juglans neotropica* (IAF-JN)**, constituyendo la base volumétrica más amplia y metodológicamente consistente disponible hasta la fecha para la especie en Ecuador.

Debido al tamaño desigual de las muestras entre investigaciones y sistemas de establecimiento, se desarrolló adicionalmente la **BNV-JN-V2**, una base analítica destinada al ajuste de los modelos de regresión y a las comparaciones estadísticas. Los modelos volumétricos se ajustaron utilizando el árbol individual como unidad observacional, mientras que las comparaciones entre sistemas emplearon el sitio de estudio como unidad experimental, con el propósito de evitar problemas de pseudorreplicación y garantizar la comparabilidad entre investigaciones.

La Figura 12.13 sintetiza el procedimiento metodológico seguido para la construcción, validación y estructuración de la **BNV-JN-V2**, desde la integración de la Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN) hasta la generación de la base analítica utilizada para el desarrollo de los modelos volumétricos y las comparaciones entre sistemas de establecimiento y manejo.

Figura 12.13

Proceso metodológico para la construcción, validación y estructuración de la Base Nacional Volumétrica de Juglans neotropica (BNV-JN-V2)



Nota. La BNV-JN-V2 se construyó mediante un proceso secuencial de integración, auditoría, armonización y validación de registros dasométricos provenientes de diferentes investigaciones desarrolladas en Ecuador. A partir de la BNDI-JN se calcularon uniformemente el área basal, el volumen total y el volumen comercial cuando fue necesario, y se integraron los registros volumétricos directos previamente auditados. La base final reunió 1 719 registros individuales, de los cuales 1 692 fueron utilizados para los análisis de volumen total, 1 582 para volumen comercial y 1 553 para el cálculo del Índice de Aprovechamiento del Fuste (*IAF-JN*). Los modelos de regresión se ajustaron utilizando el árbol individual como unidad observacional, mientras que las comparaciones entre sistemas emplearon el sitio de estudio como unidad experimental.

12.2.6.2 Desarrollo del volumen total: productividad maderable e implicaciones para el manejo silvicultural

El volumen total constituye uno de los indicadores dasométricos más integradores para evaluar la productividad de una especie forestal, ya que sintetiza simultáneamente el crecimiento diamétrico, el desarrollo en altura y la forma del fuste. A diferencia de variables individuales como el diámetro normal o la altura total, el volumen expresa directamente la cantidad de madera producida por árbol y representa uno de los principales criterios utilizados para estimar la productividad de bosques naturales, plantaciones forestales y sistemas agroforestales. En consecuencia, su análisis permite evaluar no solo el crecimiento biológico de los árboles, sino también la respuesta del recurso forestal al ambiente y al manejo silvicultural (Avery y Burkhart, 2002; Husch et al., 2003; Pretzsch, 2009).

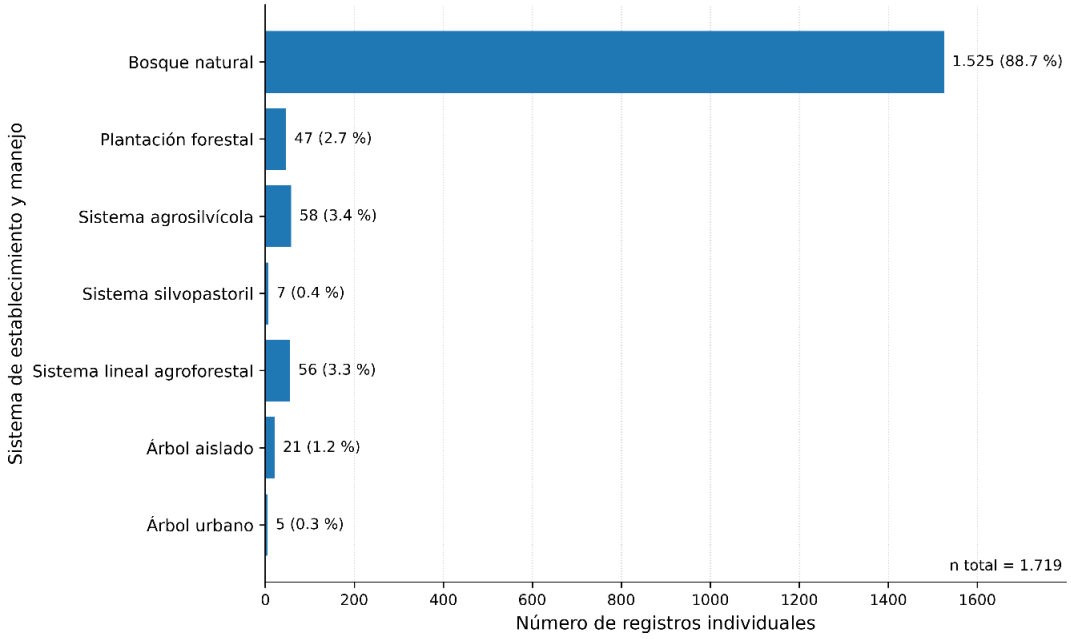
Con el propósito de generar la primera síntesis nacional del crecimiento volumétrico de *J. neotropica* en Ecuador, se utilizó la **Base Nacional Volumétrica de *J. neotropica* versión 2 (BNV-JN-V2)**, construida mediante el procedimiento metodológico descrito en el apartado anterior. Esta base integró **1 719 registros individuales** procedentes de bosques naturales, plantaciones forestales, sistemas agrosilvícolas, sistemas silvopastoriles, sistemas lineales agroforestales, árboles aislados y arbolado urbano. Después del proceso de auditoría y validación, **1 692 registros** fueron considerados aptos para el análisis del volumen total, constituyendo la base de información volumétrica más amplia y metodológicamente consistente disponible hasta la fecha para la especie en Ecuador.

A diferencia de una compilación convencional de resultados publicados, la BNV-JN-V2 integra registros volumétricos obtenidos mediante dos procedimientos complementarios: volúmenes reportados directamente por las investigaciones originales y volúmenes recalculados uniformemente a partir del diámetro normal, la altura total y los factores de forma específicos establecidos en el apartado 12.2.5. Este proceso permitió armonizar metodologías, reducir inconsistencias entre estudios y construir una base nacional comparable para el análisis de la productividad maderable.

La composición de la BNV-JN-V2 según los diferentes sistemas de establecimiento y manejo se presenta en la Figura 12.14. Por su parte, la Figura 12.15 integra dos componentes del análisis del volumen total: el panel **(a)** muestra su distribución entre los principales sistemas de establecimiento y manejo, mientras que el panel **(b)** presenta la relación entre el diámetro normal y el volumen total individual y el modelo de regresión potencial ajustado a partir de la BNV-JN-V2. Finalmente, la Tabla 12.7 resume los estadísticos descriptivos del volumen total por sistema de establecimiento y manejo, considerando el sitio como unidad experimental y el árbol individual como unidad observacional.

Figura 12.14

Composición de la Base Nacional Volumétrica de Juglans neotropica según sistema de establecimiento y manejo



Nota. Distribución de los 1 719 registros individuales que conforman la Base Nacional Volumétrica de *J. neotropica*, versión 2 (BNV-JN-V2), según sistema de establecimiento y manejo. Elaboración con base en la BNV-JN-V2 del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

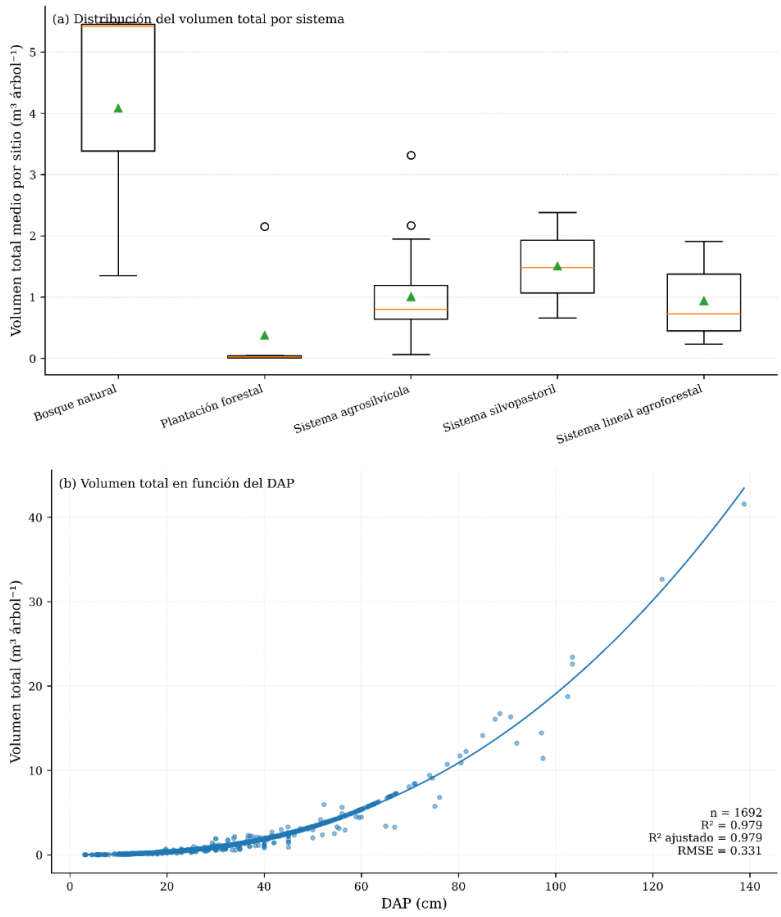
La Figura 12.15(a) evidencia una marcada variabilidad del volumen total entre los diferentes sistemas de establecimiento y manejo. Los mayores valores medios corresponden a los bosques naturales, particularmente a remanentes maduros como **El Tundo (Loja)** y **La Florencia**, donde la permanencia prolongada de los árboles favorece la acumulación de biomasa leñosa y el desarrollo de individuos de gran diámetro. Las plantaciones forestales presentan valores inferiores, aunque con una distribución más homogénea, atribuible a la uniformidad de edades, espaciamientos y prácticas silviculturales. Por su parte, los sistemas agrosilvícolas, silvopastoriles y lineales agroforestales muestran una mayor dispersión de los datos, reflejando la diversidad de arreglos espaciales, condiciones de sitio y objetivos productivos que caracterizan a estos sistemas.

Desde el punto de vista estadístico, la comparación entre sistemas indicó diferencias globales en el volumen total mediante la prueba de Kruskal–Wallis; sin embargo, las comparaciones múltiples realizadas con la prueba de Mann–Whitney y ajuste de Holm no identificaron diferencias significativas entre pares específicos de sistemas. Este resultado sugiere que la variabilidad existente entre sitios dentro de un mismo sistema es comparable a la observada entre sistemas diferentes, resaltando la influencia de factores locales como la calidad del sitio, la edad del rodal, la competencia y el manejo silvicultural sobre la productividad individual de *J. neotropica*.

La relación entre el diámetro normal y el volumen total presentó un ajuste potencial de elevada precisión (Figura 12.15(b)), confirmando que el diámetro constituye una variable dasométrica con fuerte relación predictiva para estimar el volumen individual de la especie. El elevado coeficiente de determinación obtenido demuestra que el crecimiento diamétrico explica gran parte de la variabilidad observada en el volumen total, resultado consistente con los principios clásicos de la mensura forestal, según los cuales el volumen representa la integración funcional del diámetro, la altura y la forma del fuste (Avery y Burkhart, 2002; Husch et al., 2003). La ligera dispersión observada alrededor de la curva refleja la influencia de diferencias en arquitectura del árbol, calidad del sitio y desarrollo de la copa, variables que no son captadas exclusivamente por el diámetro.

Figura 12.15

Distribución del volumen total y relación entre el diámetro normal y el volumen total individual de Juglans neotropica



Nota. **(a)** Distribución del volumen total individual por sistema de establecimiento y manejo; los triángulos representan los valores medios. **(b)** Relación entre el diámetro normal (DAP) y el volumen total individual, con la curva correspondiente al modelo de regresión potencial ajustado. El modelo se estimó con 1 692 registros validados de la Base Nacional Volumétrica de *J. neotropica*, versión 2 (BNV-JN-V2). Elaboración con base en la BNV-JN-V2 del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

La Tabla 12.8 complementa estos resultados al resumir el comportamiento del volumen total por sistema de establecimiento y manejo. Los mayores promedios se registraron en los bosques naturales, mientras que las plantaciones forestales presentaron los menores valores medios debido a la menor edad de los rodales incluidos en la base. Los sistemas agrosilvícolas, silvopastoriles y lineales agroforestales ocuparon posiciones intermedias, evidenciando el potencial de la especie para producir madera bajo esquemas de uso múltiple del suelo. La incorporación simultánea del número de sitios y del número de árboles permite interpretar adecuadamente la estructura jerárquica de la base de datos y justifica el empleo del sitio como unidad experimental en las comparaciones estadísticas.

Los patrones observados coinciden con la teoría general del crecimiento forestal, según la cual el volumen constituye el indicador más robusto de la productividad individual al integrar el efecto acumulativo del incremento diamétrico, el crecimiento en altura y la ocupación progresiva del sitio (Pretzsch, 2009). De igual forma, la amplia variabilidad observada entre árboles y entre sitios confirma que el rendimiento maderable depende no únicamente de la edad cronológica, sino también de la interacción entre la calidad del sitio, la disponibilidad de recursos, la competencia, la densidad de plantación y las intervenciones silviculturales, tal como ha sido señalado para plantaciones tropicales y sistemas agroforestales por Evans y Turnbull (2004) y Beer et al. (2003).

En conjunto, los resultados demuestran que el diámetro normal constituye una variable altamente robusta para la estimación indirecta del volumen total de *J. neotropica*, proporcionando una herramienta práctica para inventarios forestales, planes de manejo y programas de restauración. No obstante, el volumen total representa únicamente la biomasa acumulada por el árbol y no necesariamente la fracción realmente aprovechable del fuste. En este contexto, el siguiente apartado analiza el **volumen comercial**, integrando el crecimiento estructural del árbol con su potencial de aprovechamiento maderable y fortaleciendo las bases técnicas para la planificación silvicultural de *J. neotropica* en Ecuador.

12.2.6.3 Desarrollo del volumen comercial: rendimiento aprovechable e implicaciones para la producción de madera

El volumen comercial representa la fracción del fuste delimitada por la altura considerada comercial en cada registro y constituye una aproximación al volumen potencialmente aprovechable. Su interpretación como madera efectivamente utilizable requiere considerar adicionalmente defectos, rectitud, dimensiones mínimas y criterios de calidad industrial.

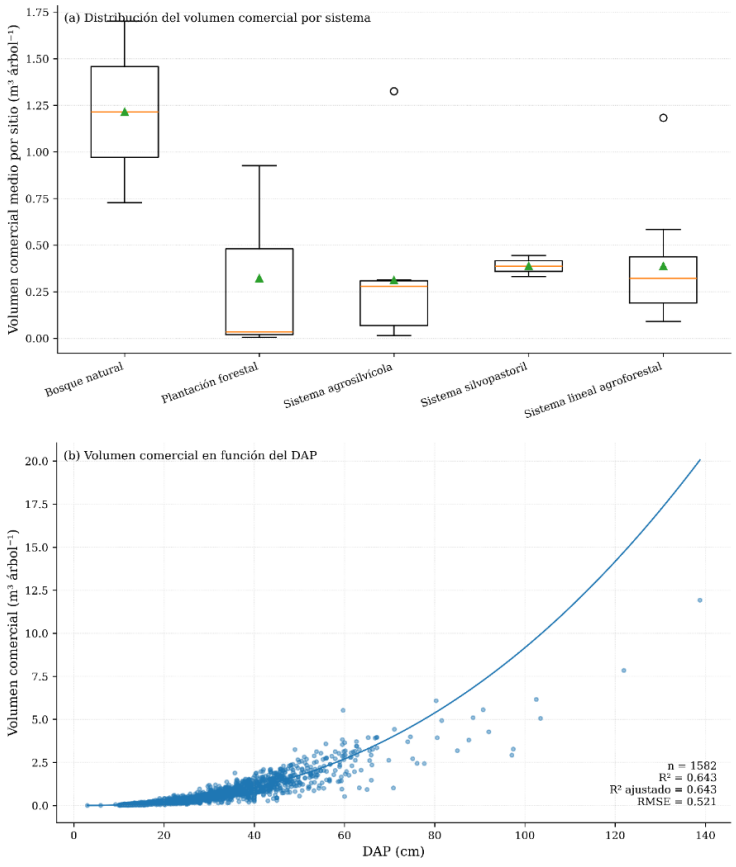
Para analizar el comportamiento del volumen comercial de *J. neotropica* se utilizó la **Base Nacional Volumétrica de *Juglans neotropica* versión 2 (BNV-JN-V2)**. Después del proceso de auditoría y validación metodológica, **1 582 registros individuales** reunieron simultáneamente información confiable de diámetro normal, altura comercial y volumen comercial, constituyendo la base analítica utilizada para este apartado. La incorporación de registros provenientes de bosques naturales, plantaciones forestales y diferentes sistemas agroforestales permitió disponer, por primera vez, de una visión nacional del rendimiento maderable potencial de la especie bajo distintos contextos ecológicos y de manejo.

Cuando las investigaciones originales no reportaban directamente el volumen comercial, éste fue estimado uniformemente mediante el área basal individual, la altura comercial y los factores de forma específicos definidos en el apartado 12.2.5. La armonización metodológica permitió eliminar diferencias derivadas del empleo de procedimientos de cubicación distintos y construir una base comparable entre investigaciones, fortaleciendo la consistencia de los análisis estadísticos posteriores.

La Figura 12.16 integra dos componentes del análisis del volumen comercial: el panel **(a)** presenta su distribución entre los principales sistemas de establecimiento y manejo considerados en la BNV-JN-V2, mientras que el panel **(b)** muestra la relación entre el diámetro normal y el volumen comercial individual y el modelo de regresión potencial ajustado. Complementariamente, el apartado (b) de la Tabla 12.8 resume los estadísticos descriptivos del volumen comercial para cada sistema, considerando el sitio como unidad experimental y el árbol individual como unidad observacional.

Figura 12.16

Distribución del volumen comercial y relación entre el diámetro normal y el volumen comercial individual de Juglans neotropica



Nota. **(a)** Distribución del volumen comercial individual por sistema de establecimiento y manejo; los triángulos representan los valores medios. **(b)** Relación entre el diámetro normal (DAP) y el volumen comercial individual, con la curva correspondiente al modelo de regresión potencial ajustado. El modelo se estimó con 1 582 registros validados de la Base Nacional Volumétrica de *J. neotropica*, versión 2 (BNV-JN-V2). Elaboración con base en la BNV-JN-V2 del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

La Figura 12.16(a) evidencia que los mayores valores medios de volumen comercial corresponden a los bosques naturales, donde la presencia de árboles maduros con fustes largos y diámetros elevados incrementa el rendimiento potencial de madera. Las plantaciones forestales presentan valores más homogéneos, reflejando la uniformidad de edades, espaciamientos y prácticas silviculturales aplicadas durante su establecimiento. Los sistemas agrosilvícolas, silvopastoriles y lineales agroforestales muestran una mayor dispersión de los datos, consecuencia de la diversidad de arreglos espaciales, especies acompañantes, densidades de plantación y objetivos de manejo que caracterizan estos sistemas.

Aunque la comparación global mediante la prueba de Kruskal–Wallis no detectó diferencias estadísticamente significativas entre sistemas para el volumen comercial, la variabilidad observada pone de manifiesto que el rendimiento maderable depende no únicamente del tamaño del árbol, sino también de la longitud efectiva del fuste, la rectitud del tronco, la presencia de bifurcaciones, la persistencia de ramas gruesas y otros atributos estructurales que condicionan la fracción realmente aprovechable de la biomasa leñosa. En consecuencia, árboles con volúmenes totales similares pueden presentar rendimientos comerciales diferentes dependiendo de su arquitectura y calidad tecnológica.

La relación entre el diámetro normal y el volumen comercial mostró un ajuste potencial satisfactorio (Figura 12.16(b)), confirmando que el diámetro constituye el principal predictor del volumen efectivamente aprovechable de *J. neotropica*. No obstante, el coeficiente de determinación fue inferior al obtenido para el volumen total, lo que indica que una proporción importante de la variabilidad del volumen comercial está asociada a factores estructurales adicionales que no son explicados únicamente por el crecimiento diamétrico. Entre ellos destacan la longitud comercial del fuste, la forma del tronco, la conicidad, la presencia de defectos y el efecto acumulado de las intervenciones silviculturales, particularmente las podas de formación y el control de la competencia.

La Tabla 12.8 (b) complementa estos resultados al sintetizar el comportamiento del volumen comercial por sistema de establecimiento y manejo. Los mayores promedios se registraron en los bosques naturales, seguidos por los sistemas silvopastoriles y lineales agroforestales, mientras que las plantaciones forestales y los sistemas agrosilvícolas presentaron valores medios inferiores. La inclusión simultánea del número de sitios y del número de árboles permite interpretar adecuadamente la estructura jerárquica de la base de datos y justifica la utilización del sitio como unidad experimental en las comparaciones estadísticas.

Los patrones observados concuerdan con los principios generales de la mensura forestal, donde el volumen comercial constituye el indicador más representativo del rendimiento efectivo de un rodal y de la eficiencia del manejo silvicultural (Avery y Burkhart, 2002). De igual forma, la influencia de la longitud del fuste y de la calidad estructural sobre la producción de madera coincide con lo señalado por Evans y Turnbull (2004), quienes destacan que las prácticas de formación, la regulación de la densidad y el control de la competencia determinan en gran medida la producción de trozas de alto valor. En sistemas agroforestales tropicales, Beer et al. (2003) señalan además que la heterogeneidad del ambiente de crecimiento genera una elevada variabilidad en la

conformación del fuste y, por consiguiente, en el rendimiento comercial de las especies arbóreas.

En el caso de *J. neotropica*, estos resultados demuestran que el potencial productivo de la especie no depende únicamente de la acumulación de biomasa, sino también de su capacidad para desarrollar fustes rectos, continuos y de elevada calidad tecnológica. Desde esta perspectiva, el volumen comercial constituye un indicador estratégico para la planificación de plantaciones con fines maderables, la valoración económica de los rodales y la definición de tratamientos silviculturales orientados a maximizar el aprovechamiento industrial.

Finalmente, el análisis conjunto del volumen total y del volumen comercial evidencia que ambas variables describen dimensiones complementarias de la productividad forestal. Mientras el volumen total expresa la biomasa leñosa acumulada por el árbol, el volumen comercial representa la fracción efectivamente utilizable para la producción de madera. En consecuencia, la relación entre ambas variables permite desarrollar un indicador sintético de eficiencia del aprovechamiento del fuste. Sobre esta base, el siguiente apartado presenta el **Índice de Aprovechamiento del Fuste de *Juglans neotropica* (IAF-JN)**, propuesto como una herramienta para evaluar el potencial de utilización maderable de la especie bajo diferentes sistemas de establecimiento y manejo.

12.2.6.4 Relación entre el volumen total y el volumen comercial: eficiencia estructural del fuste

El volumen total y el volumen comercial representan dos dimensiones complementarias de la productividad forestal. Mientras el volumen total expresa la biomasa leñosa acumulada por el árbol, el volumen comercial cuantifica únicamente la fracción del fuste que reúne las características dimensionales y estructurales requeridas para su aprovechamiento industrial. En consecuencia, la relación entre ambas variables constituye un indicador de la eficiencia con la que el crecimiento del árbol se transforma en madera potencialmente utilizable, proporcionando una medida objetiva de la calidad estructural del fuste y de su aptitud para la producción de trozas (Avery y Burkhart, 2002; Husch et al., 2003).

En especies forestales destinadas a la producción de madera de alto valor, la proporción de volumen comercial respecto al volumen total depende de múltiples factores, entre ellos la rectitud del fuste, la longitud comercial, la conicidad, la presencia de bifurcaciones, el diámetro mínimo de aprovechamiento y las prácticas silviculturales aplicadas durante el crecimiento. Por ello, árboles con volúmenes totales semejantes pueden presentar rendimientos comerciales considerablemente diferentes, dependiendo de su arquitectura y de la calidad tecnológica del fuste (Evans y Turnbull, 2004; Pretzsch, 2009).

Con el propósito de cuantificar esta relación para *J. neotropica*, se desarrolló el **Índice de Aprovechamiento del Fuste de *Juglans neotropica* (IAF-JN)**, calculado a partir de los **1 553 registros** de la **BNV-JN-V2** que disponían simultáneamente de información válida de volumen total y volumen comercial. Este índice expresa el porcentaje del volumen total del árbol que corresponde al volumen comercial

efectivamente aprovechable y constituye un indicador sintético de eficiencia estructural del fuste.

El IAF-JN se estimó mediante la siguiente expresión:

$$IAF\text{-}JN = \left(\frac{V_c}{V_t}\right) \times 100$$

donde:

IAF-JN = Índice de Aprovechamiento del Fuste de *Juglans neotropica* (%)

Vc = volumen comercial (m^3 $árbol^{-1}$)

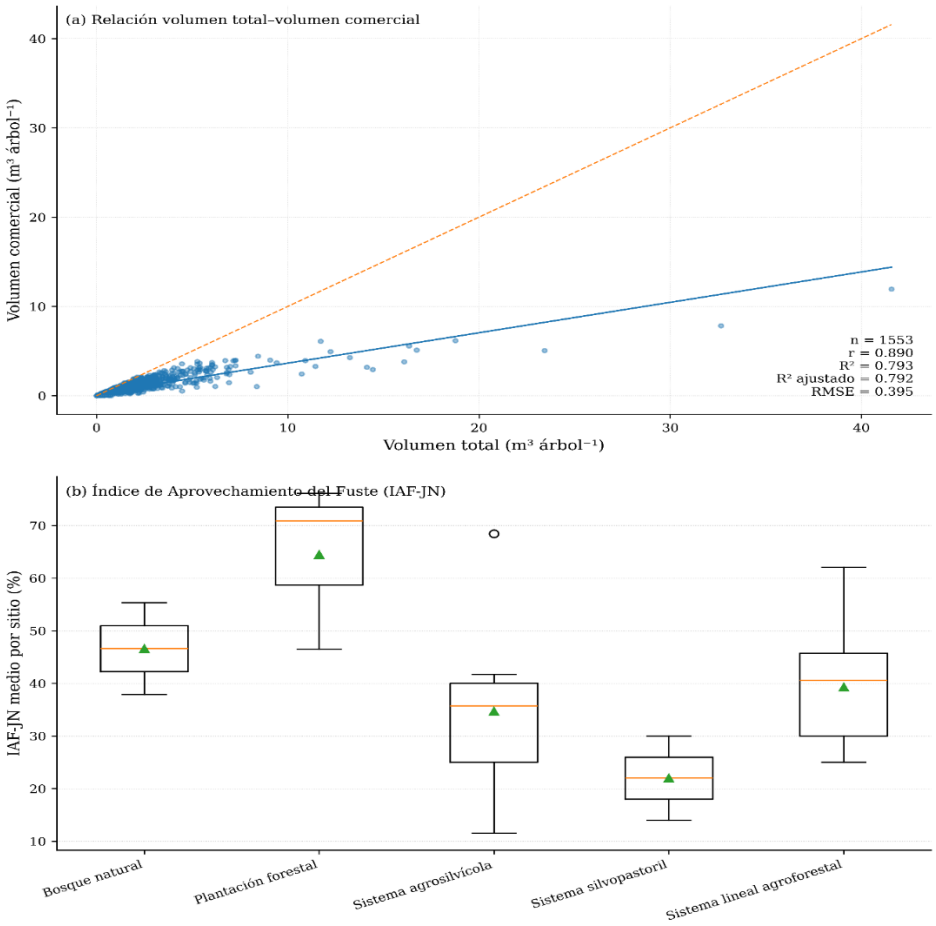
Vt = volumen total (m^3 $árbol^{-1}$)

Valores elevados del índice indican una mayor proporción de madera potencialmente aprovechable respecto al volumen total del árbol, mientras que valores bajos reflejan una menor eficiencia estructural del fuste, generalmente asociada a bifurcaciones tempranas, copas amplias, defectos de forma o reducida longitud comercial.

La Figura 12.17(a) presenta la distribución del IAF-JN según los principales sistemas de establecimiento y manejo considerados en la BNV-JN-V2, mientras que la Figura 12.17(b) muestra la relación funcional entre el volumen total y el volumen comercial, evidenciando la forma en que ambas variables determinan el aprovechamiento potencial del fuste. Complementariamente, la Tabla 12.8(c) resume los estadísticos descriptivos del IAF-JN por sistema de establecimiento y manejo, considerando el sitio como unidad experimental y el árbol individual como unidad observacional.

Figura 12.17

Índice de Aprovechamiento del Fuste de Juglans neotropica (IAF-JN) según sistema de establecimiento y manejo y relación entre el volumen total y el volumen comercial



Nota. **(a)** Distribución del Índice de Aprovechamiento del Fuste de *J. neotropica* (IAF-JN) según sistema de establecimiento y manejo; cada punto representa un árbol incluido en la BNV-JN-V2, las cajas muestran el rango intercuartílico y la línea horizontal corresponde a la mediana de cada sistema. **(b)** Relación entre el volumen total y el volumen comercial utilizada para el cálculo del IAF-JN. Los análisis comparativos entre sistemas utilizaron el sitio como unidad experimental. Elaboración con base en la BNV-JN-V2 del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

La Figura 12.17(a) muestra que el IAF-JN presenta una variabilidad importante entre los diferentes sistemas de establecimiento y manejo. Descriptivamente, el mayor IAF-JN medio se registró en las plantaciones forestales (64,48 %), seguido por bosque natural (46,58 %), sistemas lineales agroforestales (39,27 %), agrosilvícolas (34,68 %) y silvopastoriles (21,97 %). Estos valores deben interpretarse considerando la desigual representación de sitios y árboles entre categorías.

Complementariamente, el apartado (c) de la Tabla 12.8 presenta los estadísticos descriptivos del Índice de Aprovechamiento del Fuste (IAF-JN) según sistema de

establecimiento y manejo. La tabla integra además los resultados correspondientes al volumen total y al **volumen comercial, permitiendo comparar conjuntamente las tres variables analizadas.**

Tabla 12.8

Estadísticos descriptivos del volumen total, volumen comercial e Índice de Aprovechamiento del Fuste (IAF-JN) de Juglans neotropica según sistema de establecimiento y manejo en Ecuador

(a) Volumen total

Sistema de establecimiento y manejo	Sitios (n)	Árboles (n)	Media ± DE (m³ árbol⁻¹)	Rango	Comparación múltiple
Bosque natural	3	1 524	4,081 ± 2,369	1,346–5,479	a
Plantación forestal	6	47	0,375 ± 0,870	0,006–2,150	a
Sistema agrosilvícola	26	58	1,007 ± 0,740	0,063–3,314	a
Sistema silvopastoril	3	7	1,505 ± 0,860	0,657–2,378	a
Sistema lineal agroforestal	11	56	0,939 ± 0,587	0,234–1,906	a

(b) Volumen comercial

Sistema de establecimiento y manejo	Sitios (n)	Árboles (n)	Media ± DE (m³ árbol⁻¹)	Rango	Comparación múltiple
Bosque natural	2	1 514	1,215 ± 0,688	0,728–1,701	a
Plantación forestal	3	22	0,322 ± 0,523	0,006–0,926	a
Sistema agrosilvícola	9	12	0,312 ± 0,398	0,016–1,326	a
Sistema silvopastoril	2	5	0,388 ± 0,079	0,331–0,444	a
Sistema lineal agroforestal	10	29	0,388 ± 0,321	0,091–1,183	a

(c) Índice de Aprovechamiento del Fuste (IAF-JN)

Sistema de establecimiento y manejo	Sitios (n)	Árboles (n)	Media ± DE (%)	Rango	Comparación múltiple
Bosque natural	2	1 485	46,58 ± 12,32	37,87–55,30	a
Plantación forestal	3	22	64,48 ± 15,83	46,45–76,11	a
Sistema agrosilvícola	9	12	34,68 ± 16,18	11,54–68,44	a
Sistema silvopastoril	2	5	21,97 ± 11,35	13,94–30,00	a
Sistema lineal agroforestal	10	29	39,27 ± 11,67	25,00–62,07	a

Nota. **(a)** Corresponde al volumen total del árbol; **(b)**, al volumen comercial del fuste; y **(c)**, al Índice de Aprovechamiento del Fuste (IAF-JN). La unidad experimental correspondió al sitio de estudio y la unidad observacional al árbol individual. Los valores representan estadísticos calculados sobre las medias por sitio. Las diferencias globales entre sistemas se evaluaron mediante la prueba de Kruskal–Wallis y las comparaciones pareadas mediante la prueba de Mann–Whitney con ajuste de Holm. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas entre pares de sistemas después del ajuste ($p \geq 0,05$). DE = desviación estándar.

La prueba global de Kruskal–Wallis no alcanzó el nivel convencional de significación estadística ($p \geq 0,05$), y las comparaciones múltiples tampoco detectaron diferencias significativas entre pares de sistemas después del ajuste de Holm.

La Figura 12.17(b) evidencia una relación positiva entre el volumen total y el volumen comercial, confirmando que el incremento de la biomasa leñosa generalmente se acompaña de un aumento del volumen potencialmente aprovechable. Sin embargo, la dispersión observada alrededor de la relación indica que dicho incremento no ocurre de manera proporcional en todos los árboles. En consecuencia, individuos con volúmenes totales semejantes pueden diferir considerablemente en la fracción de madera comercial disponible, lo que resalta la importancia de incorporar indicadores de calidad del fuste además de las variables tradicionales de crecimiento.

Desde una perspectiva silvicultural, el IAF-JN representa un indicador complementario a las variables tradicionales de crecimiento, ya que permite evaluar simultáneamente la producción de biomasa y la eficiencia del aprovechamiento maderable. En consecuencia, árboles con elevados incrementos volumétricos pueden no necesariamente presentar los mayores rendimientos comerciales si desarrollan fustes cortos, bifurcados o con defectos estructurales. Este comportamiento coincide con los principios de la mensura forestal y de la silvicultura de calidad, donde la productividad debe analizarse conjuntamente con la calidad del fuste y el rendimiento industrial de la madera (Avery y Burkhart, 2002; Evans y Turnbull, 2004; Pretzsch, 2009).

La incorporación del IAF-JN constituye uno de los principales aportes metodológicos de esta investigación, al proporcionar un indicador cuantitativo para comparar la eficiencia estructural del fuste entre diferentes sistemas de establecimiento y manejo de *J. neotropica*. Su aplicación puede contribuir al seguimiento de plantaciones, la evaluación de programas de restauración forestal, la selección de procedencias y la definición de tratamientos silviculturales orientados a maximizar la producción de madera de alto valor. Asimismo, este índice constituye una herramienta útil para integrar criterios de crecimiento, calidad del fuste y rendimiento industrial en futuras evaluaciones de la especie bajo diferentes condiciones ecológicas y de manejo.

12.2.6.5 Tablas volumétricas para la estimación del volumen de J. neotropica

Las tablas volumétricas constituyen una de las herramientas más utilizadas en la mensura forestal, debido a que permiten estimar rápida y confiablemente el volumen individual de los árboles a partir de variables fácilmente medibles en campo, reduciendo significativamente el tiempo requerido para los inventarios forestales y la planificación del manejo silvicultural (Avery y Burkhart, 2002; Husch et al., 2003). Su aplicación resulta especialmente importante en programas de restauración, inventarios de producción y planes de aprovechamiento, donde la cubicación individual de todos los árboles no es operativamente viable.

En Ecuador, el desarrollo de tablas volumétricas específicas para *J. neotropica* ha sido limitado. Hasta la fecha únicamente se dispone de dos contribuciones nacionales que

han generado herramientas de estimación para la especie bajo condiciones ecológicas diferentes. La primera corresponde al trabajo desarrollado por Palacios et al. (2017) en plantaciones forestales de la provincia de Loja, mientras que la segunda fue elaborada por López (2023) a partir de sistemas agrosilvícolas establecidos en la provincia de Imbabura. Aunque ambos estudios representan avances importantes para la biometría forestal de la especie, difieren en la procedencia de los datos, el tamaño de la muestra, el tipo de ecosistema evaluado y los modelos matemáticos empleados para la estimación del volumen.

Tablas volumétricas de una entrada

Las tablas de una entrada utilizan una única variable independiente, generalmente el diámetro normal (DAP), para estimar el volumen del árbol. Su principal ventaja radica en la rapidez de aplicación durante los inventarios forestales, ya que únicamente requieren la medición del diámetro a la altura del pecho, variable que puede obtenerse con elevada precisión mediante procedimientos rutinarios de campo (Avery y Burkhart, 2002).

Como antecedente para la especie en Ecuador, la Tabla 12.9 presenta la comparación realizada por Palacios et al. (2017) entre el volumen obtenido mediante cubicación directa y dos procedimientos de estimación en una plantación forestal de Loja.

Tabla 12.9

Comparación de métodos de estimación del volumen individual de Juglans neotropica en una plantación forestal de Loja

Numero de árbol	V. real (m^3)	V= G*HC*-FF (m^3)	V= a+b X (m^3)
1	0,39	0,39	0,50
2	0,94	0,93	0,98
3	0,76	0,71	0,81
4	0,80	0,82	0,89
5	0,51	0,50	0,61
6	0,72	0,75	0,84
7	0,84	0,82	0,89
8	0,59	0,62	0,61
9	0,46	0,50	0,61
10	0,87	0,93	0,98
11	0,53	0,50	0,61
12	0,65	0,65	0,75
13	0,46	0,44	0,56
14	1,06	0,97	1,0
15	0,55	0,53	0,64

Tabla 12.9 (continuación)

Comparación de métodos de estimación del volumen individual de Juglans neotropica en una plantación forestal de Loja

Numero de árbol	V. real (m^3)	V= G*HC*-FF (m^3)	V= a+b X (m^3)
16	0,52	0,53	0,64
17	0,81	0,78	0,86
18	0,94	0,93	0,98
19	0,61	0,59	0,70
20	0,52	0,50	0,61
21	0,71	0,78	0,70
22	1,13	1,10	1,09
23	0,69	0,71	0,81
24	0,56	0,53	0,64
25	0,35	0,39	0,50

Nota. Adaptado de Palacios et al. (2017). La Tabla 12.9 compara el volumen real obtenido mediante cubicación directa con dos procedimientos de estimación. Los valores estimados mediante área basal, altura comercial y factor de forma se aproximaron a los volúmenes obtenidos mediante cubicación en los árboles evaluados, mientras que el modelo lineal presentó diferencias de magnitud variable.

Desde el punto de vista metodológico, este trabajo constituye uno de los primeros esfuerzos por validar ecuaciones volumétricas específicas para la especie en Ecuador y proporciona una referencia importante para el desarrollo posterior de modelos de estimación más robustos.

Posteriormente, López (2023) desarrolló una tabla volumétrica de una entrada utilizando el modelo de Hohenadl–Krenn, ajustado para árboles con diámetros comprendidos entre 10 y 65 cm de DAP, cuyos valores estimados se presentan en la Tabla 12.10.

Tabla 12.10

Tabla volumétrica de una entrada para Juglans neotropica obtenida mediante el modelo de Hohenadl–Krenn en sistemas agrosilvícolas de Imbabura

DAP (cm)	Volumen (m^3)	DAP (cm)	Volumen (m^3)
10	0,004	38	0,341
11	0,006	39	0,356
12	0,016	40	0,371
13	0,026	41	0,386
14	0,037	42	0,402
15	0,047	43	0,417
16	0.058	44	0,433
17	0.059	45	0,449
18	0,080	46	0,465
19	0,091	47	0,482
20	0,103	48	0,498
21	0,115	49	0,515
22	0,127	50	0,532
23	0,139	51	0,549
24	0,151	52	0,566
25	0,163	53	0,584
26	0,176	54	0,601
27	0,189	55	0,619
28	0,202	56	0,637
29	0,215	57	0,655
30	0,228	58	0,674
31	0,241	59	0,692
32	0,255	60	0,711
33	0,269	61	0,730
34	0,283	62	0,749
35	0,297	63	0,768
36	0,312	64	0,788
37	0,326	65	0,807

Nota. Adaptado de López (2023). La Tabla 12.10 presenta el incremento del volumen estimado conforme aumenta el DAP dentro del intervalo de 10–65 cm para el cual fue construida. Su principal ventaja operativa radica en permitir estimaciones utilizando únicamente una variable de fácil medición en campo. Su aplicación debe restringirse al rango diamétrico y a condiciones comparables con aquellas utilizadas para el ajuste del modelo.

Aunque las tablas de una entrada presentan una elevada utilidad operativa, su precisión depende de que la altura y la forma del fuste mantengan relaciones relativamente estables con el diámetro. En situaciones donde existe una alta variabilidad en la altura total o en la arquitectura del árbol, la incorporación de una segunda variable mejora considerablemente la exactitud de las estimaciones volumétricas (Husch et al., 2003).

Tablas volumétricas de dos entradas

Las tablas de dos entradas incorporan simultáneamente el diámetro normal y la altura del árbol como variables predictoras, permitiendo representar con mayor fidelidad la variabilidad estructural del crecimiento forestal. Debido a que el volumen resulta de la interacción entre el área basal y la altura, estas tablas suelen proporcionar estimaciones más precisas, especialmente en especies con amplia variabilidad arquitectónica o establecidas bajo diferentes condiciones ambientales (Pretzsch, 2009).

Para *J. neotropica*, la Tabla 12.11 presenta la tabla volumétrica de dos entradas desarrollada por López (2023) mediante el modelo de Stoate para sistemas agrosilvícolas de Imbabura, en la que el volumen se estima a partir de la combinación del DAP y la altura del árbol.

Tabla 12.11

Tabla volumétrica de dos entradas para Juglans neotropica obtenida mediante el modelo de Stoate en sistemas agrosilvícolas de Imbabura

DAP (cm)	Altura (m)					
	2	3	4	5	6	7
10			0,002	0,009	0,016	0,022
11		0,001	0,008	0,015	0,022	0,029
12		0,006	0,014	0,021	0,029	0,037
13	0,004	0,012	0,020	0,028	0,037	0,045
14	0,009	0,018	0,027	0,036	0,045	0,054
15	0,015	0,025	0,034	0,044	0,054	0,063
16	0,022	0,032	0,042	0,053	0,063	0,073
17	0,029	0,040	0,051	0,062	0,073	0,084
18	0,036	0,048	0,060	0,072	0,084	0,096
19	0,043	0,056	0,069	0,082	0,095	0,108
20	0,052	0,065	0,079	0,093	0,107	0,121
21	0,060	0,075	0,090	0,104	0,119	0,134
22	0,069	0,085	0,101	0,117	0,132	0,148
23	0,078	0,095	0,112	0,129	0,146	0,163
24	0,088	0,106	0,124	0,142	0,160	0,178
25	0,098	0,118	0,137	0,156	0,175	0,194
26	0,109	0,129	0,150	0,170	0,191	0,211
27	0,120	0,142	0,163	0,185	0,207	0,229
28	0,131	0,154	0,178	0,201	0,224	0,247

Tabla 12.11 (continuación)

Tabla volumétrica de dos entradas para Juglans neotropica obtenida mediante el modelo de Stoate en sistemas agrosilvícolas de Imbabura

DAP (cm)	Altura (m)					
	2	3	4	5	6	7
29	0,143	0,168	0,192	0,216	0,241	0,265
30	0,156	0,181	0,207	0,233	0,259	0,285
31	0,168	0,196	0,223	0,250	0,277	0,305
32	0,181	0,210	0,239	0,268	0,296	0,325
33	0,195	0,225	0,256	0,286	0,316	0,347
34	0,209	0,241	0,273	0,305	0,337	0,369
35	0,223	0,257	0,290	0,324	0,358	0,391
36	0,238	0,273	0,309	0,344	0,379	0,414
37	0,253	0,290	0,327	0,364	0,401	0,438
38	0,269	0,308	0,346	0,385	0,424	0,463
39	0,285	0,325	0,366	0,407	0,448	0,488
40	0,301	0,344	0,386	0,429	0,472	0,514
41	0,318	0,363	0,407	0,452	0,496	0,541
42	0,335	0,382	0,428	0,475	0,521	0,568
43	0,353	0,402	0,450	0,499	0,547	0,596
44	0,371	0,422	0,472	0,523	0,574	0,624
45	0,390	0,442	0,495	0,548	0,601	0,654
46	0,409	0,464	0,518	0,573	0,628	0,683
47	0,428	0,485	0,542	0,600	0,657	0,714
48	0,448	0,507	0,567	0,626	0,686	0,745
49	0,468	0,530	0,591	0,653	0,715	0,777
50	0,488	0,553	0,617	0,681	0,745	0,809
51	0,509	0,576	0,643	0,709	0,776	0,843
52	0,531	0,600	0,669	0,738	0,807	0,876
53	0,553	0,624	0,696	0,768	0,839	0,911
54	0,575	0,649	0,723	0,979	0,872	0,946
55	0,598	0,674	0,751	0,828	0,905	0,982
56	0,621	0,700	0,780	0,859	0,939	1,018
57	0,644	0,726	0,809	0,891	0,973	1,055
58	0,668	0,753	0,838	0,923	1,008	1,093
59	0,692	0,780	0,868	0,956	1,043	1,131
60	0,717	0,808	0,898	0.989	1,080	1,170
61	0,742	0,836	0,929	1,023	1,116	1,210
62	0,768	0,864	0,961	1,057	1,154	1,250
63	0,794	0,893	0,993	1,092	1,192	1,291
64	0,820	0,923	1,025	1,128	1,230	1,333
65	0,847	0,953	1,058	1,164	1,270	1,375

Nota. Adaptado de López (2023).

La Tabla 12.11 muestra el incremento simultáneo del volumen estimado conforme aumentan el diámetro normal y la altura del árbol. La incorporación conjunta de ambas variables permite representar explícitamente diferencias de altura entre árboles de diámetro semejante; la magnitud de la mejora respecto de modelos de una entrada debe evaluarse mediante los estadísticos de ajuste y validación de cada modelo.

Comparada con las tablas de una entrada, la tabla de doble entrada proporciona una herramienta de mayor precisión para inventarios forestales detallados, estudios de crecimiento y evaluación del rendimiento maderable, aunque requiere un mayor esfuerzo de medición en campo.

En conjunto, los trabajos de Palacios et al. (2017) y López (2023) constituyen los principales antecedentes identificados en Ecuador para la estimación volumétrica de *J. neotropica*. Sus resultados muestran la posibilidad de desarrollar ecuaciones específicas para la especie bajo condiciones determinadas de crecimiento y proporcionan referencias metodológicas para inventarios y estudios biométricos. Debido a que estas herramientas fueron desarrolladas a partir de muestras y condiciones locales, su aplicación fuera de los rangos y sistemas donde fueron ajustadas requiere validación independiente.

La disponibilidad de la Base Nacional Volumétrica (BNV-JN-V2), integrada por 1 719 registros individuales y armonizada mediante procedimientos comunes, constituye una base para el desarrollo y validación futura de modelos y tablas volumétricas de mayor representatividad geográfica. Para avanzar hacia una herramienta de aplicación nacional será necesario evaluar explícitamente su desempeño predictivo, los rangos de aplicación, la variación entre sistemas de establecimiento y la validación con información independiente.

12.2.7. Relaciones alométricas entre el crecimiento del fuste y la arquitectura de copa de *J. neotropica*

Las relaciones alométricas describen la forma en que diferentes atributos morfológicos del árbol varían de manera conjunta durante su crecimiento y constituyen una de las bases conceptuales de la biometría y la silvicultura forestal. En especies maderables, dichas relaciones permiten interpretar la asignación de biomasa entre el fuste y la copa, estimar el espacio vital requerido por cada individuo y comprender los mecanismos de competencia que regulan el desarrollo de los rodales (Assmann, 1970; Avery y Burkhart, 2002; Pretzsch, 2009).

En *J. neotropica*, la arquitectura de copa constituye un atributo funcional relacionado con la interceptación de radiación, el crecimiento del árbol y la ocupación del espacio; además, su desarrollo y manejo influyen sobre la ramificación y la conformación del fuste, aspectos relevantes cuando el objetivo silvicultural incluye la producción de madera de calidad.

A diferencia de estudios previos desarrollados en plantaciones o sitios experimentales específicos, las relaciones alométricas presentadas en este capítulo fueron obtenidas utilizando la Base Nacional Dasométrica Integrada de *Juglans neotropica* (BNDI-JN), construida mediante la integración, auditoría y armonización de registros procedentes de bosques naturales, plantaciones forestales, sistemas agrosilvícolas,

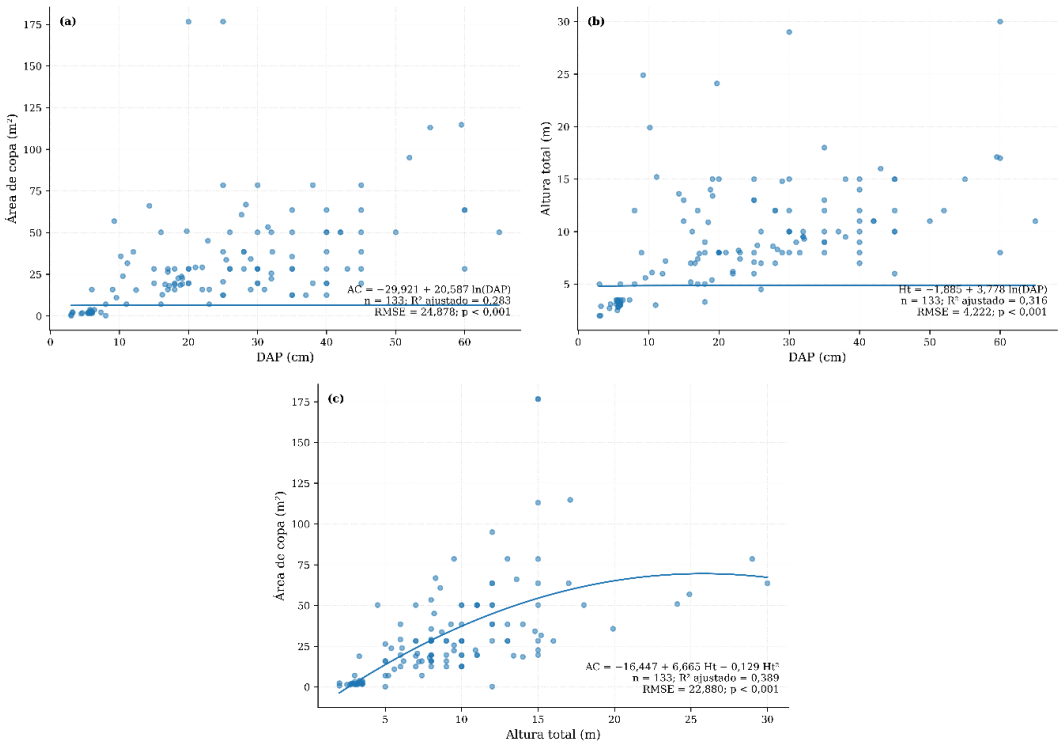
sistemas silvopastoriles, sistemas lineales agroforestales, árboles aislados y arbolado urbano distribuidos en diferentes provincias del Ecuador. Este enfoque permitió evaluar el comportamiento alométrico de la especie bajo una amplia diversidad de condiciones ambientales y sistemas de establecimiento, proporcionando una representación de alcance geográfico más amplio del crecimiento que la obtenida a partir de estudios locales.

Con base en esta información se analizaron tres relaciones alométricas fundamentales: (i) entre el diámetro a la altura del pecho (DAP) y el área de copa, (ii) entre el DAP y la altura total, y (iii) entre la altura total y el área de copa. En conjunto, estas relaciones describen la interacción entre el crecimiento radial, el crecimiento longitudinal y la expansión del dosel, constituyendo herramientas de apoyo para la planificación del espaciamiento, la regulación de la competencia, la programación de raleos y la evaluación del potencial productivo de la especie.

La Figura 12.18 presenta los modelos de regresión obtenidos para las tres relaciones alométricas analizadas. Estas relaciones se interpretan como asociaciones estructurales dentro del dominio de los datos disponibles y no como relaciones causales.

Figura 12.18

Relaciones alométricas entre el crecimiento del fuste y la arquitectura de copa de Juglans neotropica en Ecuador



Nota. (a) Relación entre el diámetro a la altura del pecho (DAP) y el área de copa; (b) relación entre el DAP y la altura total; y (c) relación entre la altura total y el área de copa. Los modelos fueron ajustados utilizando la Base Nacional Dasométrica Integrada de *Juglans neotropica* (BNDI-JN), integrada por registros procedentes de diferentes sistemas de establecimiento y manejo distribuidos en Ecuador.

La Figura 12.18(a) muestra una asociación positiva entre el DAP y el área de copa, indicando que los árboles de mayor diámetro tienden a presentar copas de mayor superficie dentro del conjunto de datos analizado. La estrecha relación entre ambas variables permite utilizar el DAP como un indicador práctico de la expansión lateral del árbol dentro del dominio representado por los datos.

La Figura 12.18(b) muestra una relación positiva entre el DAP y la altura total, aunque con mayor dispersión que la relación DAP–área de copa. Esto indica que árboles con diámetros semejantes pueden alcanzar alturas diferentes. Entre los factores que potencialmente contribuyen a esta variabilidad se encuentran la calidad del sitio, la competencia, la densidad, el sistema de establecimiento y la historia de manejo.

Por su parte, la Figura 12.18(c) muestra una relación positiva entre la altura total y el área de copa, aunque con un ajuste menor que la relación DAP–área de copa. Dentro de los datos analizados, este resultado indica una asociación más estrecha del área de copa con el diámetro que con la altura total.

12.2.8 Índice de sitio y productividad potencial de *J. neotropica*

El índice de sitio constituye uno de los indicadores más ampliamente utilizados en la biometría y la silvicultura para evaluar la productividad potencial de los ecosistemas forestales. A diferencia de las variables dasométricas que describen el estado actual de un rodal, el índice de sitio representa la capacidad inherente del ambiente para sostener el crecimiento en altura de una especie bajo determinadas condiciones ecológicas. Debido a que el crecimiento dominante refleja principalmente la influencia del sitio y es relativamente poco afectado por la densidad del rodal o por las intervenciones silviculturales, la relación entre la altura dominante y la edad ha sido utilizada durante más de un siglo como el principal criterio para clasificar la calidad productiva de los terrenos forestales (Assmann, 1970; Avery y Burkhart, 2002; Clutter et al., 1983; Pretzsch, 2009).

En términos silviculturales, el índice de sitio constituye una herramienta estratégica para la planificación del manejo forestal, ya que permite estimar el potencial de crecimiento futuro, orientar la selección de áreas para el establecimiento de plantaciones, definir tratamientos silviculturales diferenciados y proyectar la productividad maderable de los rodales. Asimismo, proporciona un criterio objetivo para comparar sitios con condiciones ambientales distintas, facilitando la evaluación de alternativas de restauración ecológica, conservación y producción forestal (Burkhart y Tomé, 2012; Skovsgaard y Vanclay, 2008).

A pesar de su importancia, hasta el momento no existían curvas nacionales de índice de sitio para *J. neotropica* en Ecuador. Los pocos estudios desarrollados sobre crecimiento en altura corresponden a investigaciones locales realizadas en plantaciones o sistemas agroforestales específicos (López, 2023; Palacios et al., 2017), cuyos resultados, aunque valiosos, no permiten caracterizar la productividad potencial de la especie a escala

nacional debido a diferencias en el tamaño de muestra, condiciones ecológicas, edades evaluadas y metodologías empleadas.

Con el propósito de superar estas limitaciones, en la presente investigación se desarrolló la **Base Nacional de Índice de Sitio de *Juglans neotropica* (BNIS-JN)**, construida a partir de la Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN) mediante un proceso estandarizado de auditoría, armonización y validación de registros provenientes de diferentes provincias, sistemas de establecimiento y fuentes de información. Sobre esta base se ajustaron diversos modelos de crecimiento altura–edad, se seleccionó la función con mejor desempeño estadístico y coherencia biológica, y se desarrollaron la primera curva guía nacional, las primeras curvas nacionales de índice de sitio y una clasificación preliminar de productividad para la especie.

El desarrollo de la BNIS-JN representa un avance metodológico significativo para la silvicultura del nogal andino, ya que complementa las bases nacionales generadas en los apartados precedentes —la Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN), la Base Nacional Volumétrica (BNV-JN-V2) y la Base Analítica de Arquitectura de Copa (BAC-JN)— consolidando un sistema integrado de información para el análisis del crecimiento, la productividad y el manejo silvicultural de *J. neotropica* en Ecuador.

12.2.8.1 Construcción de la Base Nacional de Índice de Sitio de Juglans neotropica (BNIS-JN)

Con el propósito de desarrollar una primera propuesta de índice de sitio de alcance nacional para *J. neotropica*, se construyó la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN) a partir de la información disponible y armonizada en la BNDI-JN. La base analítica quedó conformada por 78 árboles dominantes procedentes de diferentes provincias y sistemas de establecimiento, lo que permitió explorar y modelar la relación altura dominante–edad a escala nacional.

La construcción de la BNIS-JN comprendió un proceso secuencial de auditoría, armonización y validación de registros dasométricos. En una primera etapa se revisó la consistencia de las variables edad y altura total contenidas en la BNDI-JN, verificando la integridad de los registros, la coherencia biológica de los datos y la ausencia de inconsistencias derivadas de errores de medición o transcripción. Posteriormente, se identificaron los árboles dominantes o codominantes aptos para el análisis, debido a que el crecimiento dominante constituye la variable de referencia utilizada internacionalmente para el desarrollo del índice de sitio al reflejar de manera más fiel la calidad productiva del ambiente y minimizar el efecto de la competencia intraespecífica (Assmann, 1970; Pretzsch, 2009).

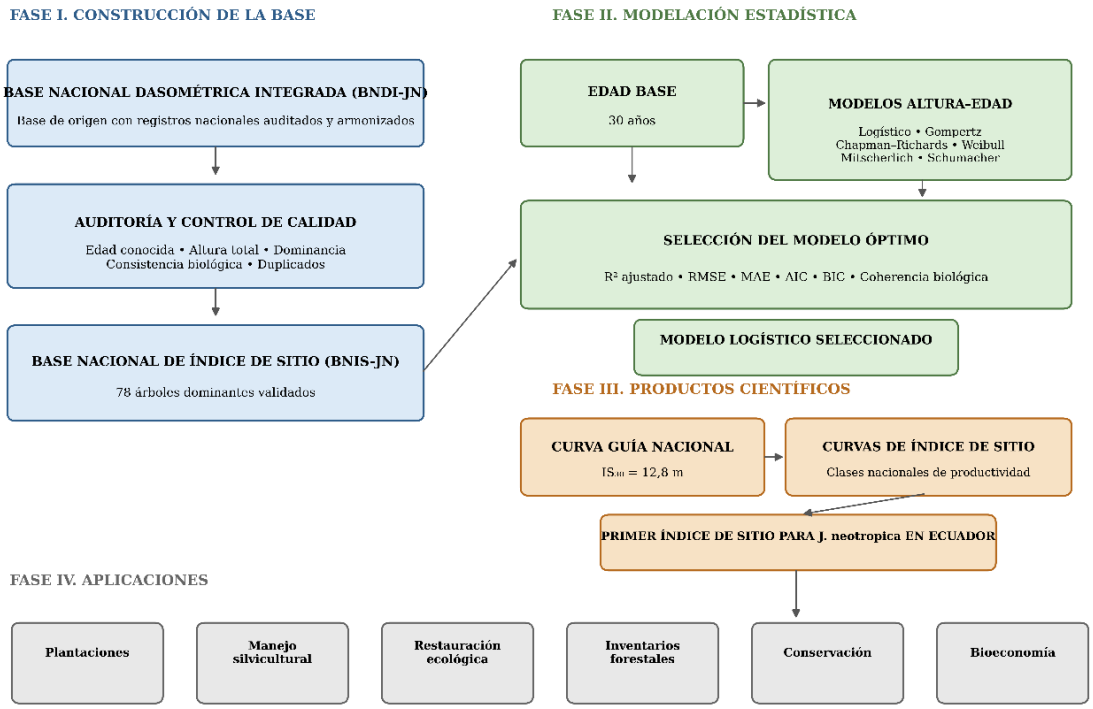
Como parte del proceso de auditoría, se excluyeron aquellos registros que presentaban edades desconocidas, alturas incompletas, inconsistencias biológicas evidentes o duplicaciones detectadas durante la integración de la base nacional. Después del control de calidad, la BNIS-JN quedó conformada por **78 árboles dominantes**, distribuidos en diferentes provincias y sistemas de establecimiento, constituyendo la base

de datos más amplia y metodológicamente homogénea disponible hasta el momento para modelar el crecimiento dominante de *J. neotropica* en Ecuador.

La Figura 12.19 resume el procedimiento metodológico utilizado para la construcción de la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN), integrando las etapas de auditoría, selección de registros, comparación de modelos de crecimiento y desarrollo de las curvas nacionales de productividad.

Figura 12.19

Proceso metodológico para la construcción de la Base Nacional de Índice de Sitio de Juglans neotropica (BNIS-JN)



Nota. La BNIS-JN integra 78 árboles dominantes seleccionados mediante la auditoría, armonización y validación de registros de la BNDI-JN. Esta información se utilizó para comparar modelos de crecimiento altura–edad y desarrollar las curvas nacionales de índice de sitio de *J. neotropica*.

12.2.8.2 Determinación de la edad base para el desarrollo del índice de sitio

La selección de la edad base constituye una de las decisiones metodológicas más importantes durante el desarrollo de un índice de sitio, ya que determina el punto de referencia a partir del cual se comparan las diferentes curvas de productividad. Desde el punto de vista conceptual, la edad base corresponde a una edad de referencia en la cual la altura dominante presenta suficiente estabilidad biológica para discriminar adecuadamente la calidad del sitio, evitando simultáneamente los altos niveles de

variabilidad propios de los estados juveniles y la pérdida de sensibilidad característica de las etapas avanzadas del crecimiento (Avery y Burkhart, 2002; Burkhart y Tomé, 2012; Clutter et al., 1983).

La literatura forestal indica que la edad base debe seleccionarse considerando tres criterios fundamentales: (i) una adecuada representación de las edades disponibles en la base de datos; (ii) un comportamiento biológicamente estable de las curvas altura–edad; y (iii) una utilidad práctica para la planificación silvicultural y la comparación entre rodales (Assmann, 1970; Pretzsch, 2009). En consecuencia, la edad base no constituye un valor arbitrario, sino el resultado de un equilibrio entre la distribución de los datos y el comportamiento fisiológico de la especie.

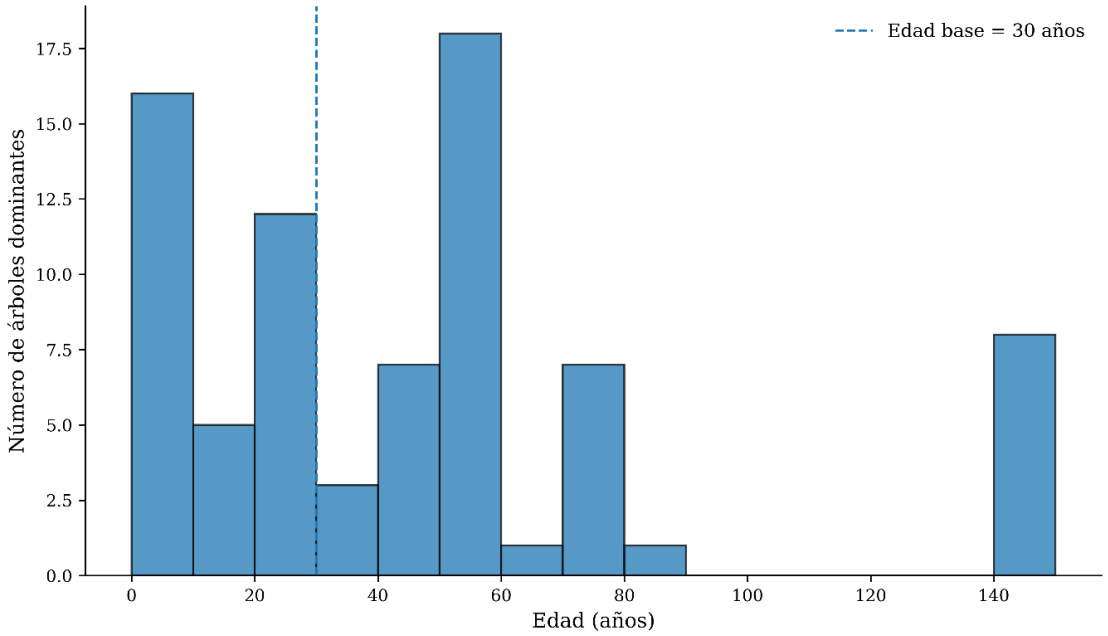
En el presente estudio, la edad base fue determinada mediante el análisis conjunto de la distribución de edades contenida en la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN), integrada por 78 árboles dominantes procedentes de diferentes provincias y sistemas de establecimiento. Se evaluó la frecuencia de registros por clases de edad, la continuidad de la información disponible y la estabilidad del crecimiento dominante, seleccionándose finalmente **30 años** como edad base para el desarrollo del índice de sitio nacional de *J. neotropica*.

La elección de esta edad responde a tres argumentos complementarios. En primer lugar, alrededor de los 30 años la BNIS-JN presenta una adecuada representación de observaciones, lo que reduce la incertidumbre asociada al ajuste de las curvas. En segundo lugar, a esta edad el crecimiento dominante mantiene una elevada sensibilidad para discriminar diferencias de productividad entre sitios, sin presentar aún la desaceleración observada en árboles maduros. Finalmente, los 30 años representan una etapa de alto interés silvicultural, ya que coincide con el período en el que comienzan a consolidarse las diferencias estructurales entre rodales y en el que las decisiones relacionadas con podas, raleos, restauración productiva o proyecciones de rendimiento adquieren mayor relevancia.

La Figura 12.20 presenta la distribución de edades de los árboles dominantes incluidos en la BNIS-JN, utilizada como base para la selección de la edad de referencia. Complementariamente, la Tabla 12.12 resume los principales estadísticos descriptivos de la base de datos empleada para el desarrollo del índice de sitio.

Figura 12.20

Distribución de edades de los árboles dominantes incluidos en la Base Nacional de Índice de Sitio de Juglans neotropica (BNIS-JN)



Nota. La Figura presenta la distribución de edades correspondiente a los 78 árboles dominantes seleccionados para el desarrollo de la BNIS-JN. La línea vertical indica la edad base adoptada (30 años), seleccionada considerando la representación de observaciones en torno a esta edad, el comportamiento de la relación altura–edad y su utilidad como referencia silvicultural.

La distribución de edades presentada en la Figura 12.20 evidencia que la BNIS-JN reúne árboles dominantes pertenecientes a un amplio gradiente ontogénico, desde individuos jóvenes hasta ejemplares maduros. Esta amplitud de edades constituye un requisito fundamental para el desarrollo de un índice de sitio confiable, ya que permite representar las diferentes fases del crecimiento dominante y reduce la incertidumbre asociada al ajuste de las funciones altura–edad. Asimismo, la concentración de registros alrededor de la edad base seleccionada (30 años) proporciona un soporte estadístico adecuado para el desarrollo de la curva guía nacional. La caracterización cuantitativa de esta base de datos se resume en la Tabla 12.12.

Tabla 12.12

Estadísticos descriptivos de la Base Nacional de Índice de Sitio de Juglans neotropica (BNIS-JN)

Variable	n	Media	DE	Mínimo	Mediana	Máximo
Edad (años)	78	45,47	39,06	4,00	42,50	142,00
Altura dominante (m)	78	15,87	8,50	2,40	13,00	33,70
DAP (cm)	78	40,85	25,13	3,23	35,01	138,78
Altitud (m s. n. m.)	78	2 342,78	446,04	925,00	2 298,00	3 035,00
Temperatura media (°C)	78	15,78	2,65	10,96	16,00	21,40
Precipitación anual (mm)	78	1 088,57	285,38	685,00	1 004,00	1 843,00

Nota. La BNIS-JN quedó conformada por 78 árboles dominantes seleccionados mediante un proceso de auditoría y control de calidad de la Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN). Los estadísticos descriptivos corresponden a las variables utilizadas para el ajuste de los modelos de crecimiento altura–edad.

En conjunto, los estadísticos descriptivos muestran que la BNIS-JN integra registros correspondientes a una amplia diversidad de condiciones de crecimiento y ambientales, proporcionando una base robusta para el ajuste de modelos de índice de sitio de alcance nacional. La combinación de un amplio rango de edades, alturas dominantes y gradientes ambientales incrementa la representatividad de la base y fortalece la capacidad predictiva de los modelos desarrollados.

Los estadísticos descriptivos evidencian la amplitud de condiciones representadas en la BNIS-JN, con árboles distribuidos a lo largo de un amplio gradiente de edades y alturas dominantes. Esta variabilidad constituye un requisito fundamental para el desarrollo de índices de sitio, ya que permite capturar una amplia gama de respuestas de crecimiento bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo, incrementando la capacidad predictiva de los modelos ajustados (Skovsgaard y Vanclay, 2008).

La presencia de registros procedentes de múltiples provincias y sistemas de establecimiento también fortalece el alcance nacional del índice de sitio desarrollado en esta investigación. A diferencia de los estudios previos realizados para *J. neotropica*, basados generalmente en una única plantación o localidad (López, 2023; Palacios et al., 2017), la BNIS-JN integra información obtenida en bosques naturales, plantaciones forestales y sistemas agroforestales, proporcionando una representación significativamente más amplia de la variabilidad ecológica de la especie en Ecuador.

Desde el punto de vista metodológico, la selección de una edad base común permitió estandarizar todas las curvas de productividad y establecer un punto de referencia único para la clasificación nacional de los sitios. Este procedimiento facilita la comparación entre rodales de diferentes edades, mejora la interpretación silvicultural de las curvas y proporciona una herramienta objetiva para la evaluación de la productividad potencial de *J. neotropica*.

Con la edad base definida y la BNIS-JN consolidada, el siguiente paso consistió en evaluar diferentes funciones matemáticas capaces de describir la relación entre la altura dominante y la edad. Para ello se ajustaron seis modelos de crecimiento ampliamente utilizados en biometría forestal, comparando su desempeño mediante criterios estadísticos y su coherencia biológica con el patrón de crecimiento observado para la especie. Los resultados de este análisis se presentan en el siguiente apartado.

12.2.8.3 Comparación y selección de los modelos de crecimiento altura–edad

La modelación de la relación entre la altura dominante y la edad constituye el fundamento matemático del índice de sitio, ya que permite describir la trayectoria potencial de crecimiento de una especie bajo diferentes condiciones de productividad. Desde la perspectiva de la biometría forestal, el objetivo principal no consiste únicamente en obtener el mayor ajuste estadístico, sino en identificar una función que represente adecuadamente el comportamiento biológico del crecimiento, permita interpolaciones confiables dentro del rango de datos observado y facilite la construcción de curvas de productividad con interpretación silvicultural (Burkhart y Tomé, 2012; Clutter et al., 1983).

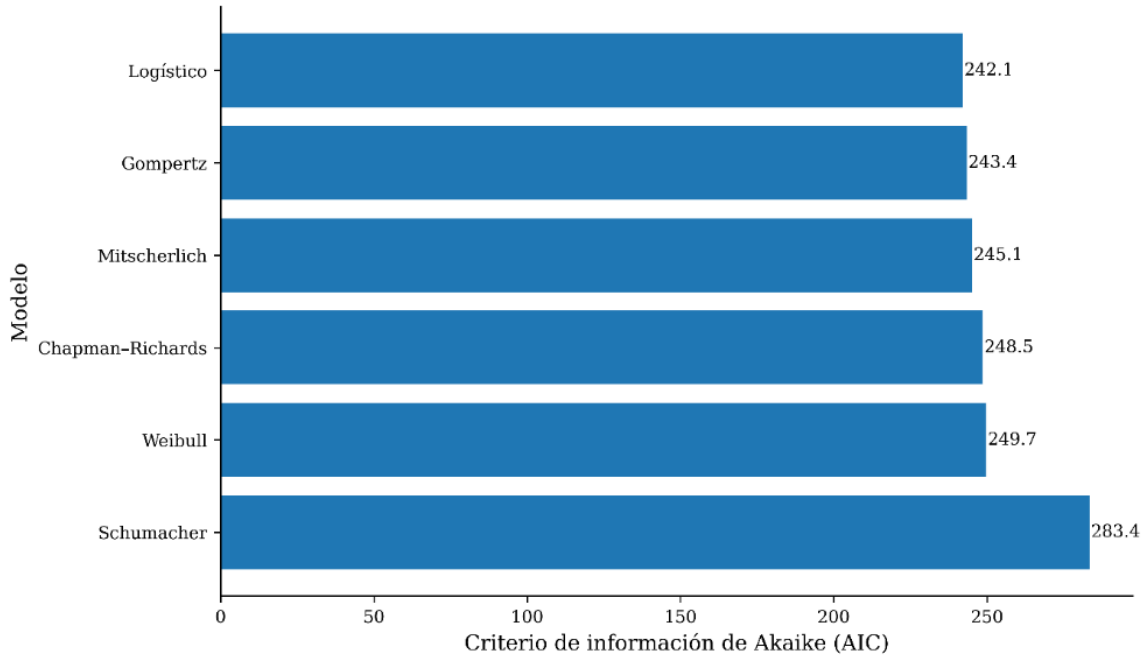
Con este propósito, utilizando la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN), se ajustaron seis modelos no lineales ampliamente empleados en estudios de crecimiento forestal: **Logístico, Gompertz, Chapman–Richards, Weibull, Mitscherlich y Schumacher**. Estas funciones fueron seleccionadas debido a su amplio uso en la modelación de especies forestales tropicales y templadas, así como por su capacidad para describir procesos de crecimiento sigmoidal y asintótico (Pretzsch, 2009; Skovsgaard y Vanclay, 2008).

Cada modelo fue ajustado utilizando como variable independiente la edad del árbol y como variable dependiente la altura dominante. Posteriormente, el desempeño de cada función se evaluó mediante un conjunto de criterios estadísticos complementarios que incluyeron el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información bayesiano (BIC). Paralelamente, se examinó la coherencia biológica de las curvas obtenidas, verificando que reprodujeran adecuadamente el patrón de crecimiento esperado para una especie forestal longeva como *J. neotropica*, caracterizado por un rápido crecimiento inicial, una fase de incremento sostenido y una desaceleración gradual conforme aumenta la edad.

La Figura 12.21 resume la comparación gráfica del desempeño de los modelos evaluados, mientras que la Tabla 12.13 presenta los principales indicadores estadísticos utilizados durante el proceso de selección.

Figura 12.21

Comparación del desempeño de los modelos de crecimiento altura–edad evaluados para el desarrollo del índice de sitio de Juglans neotropica



Nota. La figura compara el desempeño relativo de los seis modelos de crecimiento ajustados utilizando la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN). La evaluación consideró simultáneamente criterios de ajuste estadístico (R^2 ajustado, RMSE, MAE, AIC y BIC) y la coherencia biológica de las trayectorias de crecimiento.

La comparación gráfica presentada en la Figura 12.21 permite apreciar que todos los modelos reproducen la tendencia general del crecimiento en altura dominante de *J. neotropica*; sin embargo, se observan diferencias en la capacidad de cada función para representar las fases inicial, intermedia y asintótica del crecimiento. Aunque varias funciones mostraron un comportamiento biológicamente aceptable, la selección del modelo definitivo no se basó únicamente en la inspección visual de las curvas, sino en una evaluación objetiva mediante indicadores estadísticos de ajuste y capacidad predictiva. Los resultados de esta comparación cuantitativa se presentan en la Tabla 12.13.

Tabla 12.13

Comparación estadística de los modelos altura–edad ajustados para la construcción del índice de sitio de Juglans neotropica

Modelo	R^2 ajustado	RMSE	MAE	AIC	BIC	Selección
Logístico	**0,699**	**4,542**	**3,391**	**242,071**	**249,141**	✓
Gompertz	0,694	4,579	3,458	243,361	250,431	
Mitscherlich	0,687	4,630	3,521	245,095	252,165	
Chapman–Richards	0,673	4,734	3,679	248,540	255,610	
Weibull	0,668	4,769	3,723	249,690	256,761	
Schumacher	0,483	5,996	5,193	283,407	288,121	

Nota. El modelo logístico presentó el mejor desempeño estadístico al registrar el menor AIC y los menores errores de ajuste, por lo que fue seleccionado para construir la curva guía nacional y las curvas del índice de sitio.

En conjunto, los indicadores estadísticos muestran diferencias claras en el desempeño de las funciones evaluadas, permitiendo identificar el modelo que ofrece el mejor equilibrio entre precisión estadística y coherencia biológica para describir el crecimiento dominante de la especie.

Los resultados obtenidos muestran que, aunque todos los modelos describieron adecuadamente la tendencia general del crecimiento dominante, su capacidad predictiva presentó diferencias importantes. Las funciones de Gompertz, Chapman–Richards y Weibull mostraron ajustes satisfactorios dentro del rango de edades representado por la BNIS-JN; sin embargo, algunas presentaron una mayor sensibilidad en los extremos de la distribución, generando ligeras desviaciones en las fases iniciales o finales del crecimiento.

El modelo de Schumacher, por su parte, presentó el menor desempeño estadístico, reflejado en valores inferiores de R^2 ajustado y mayores errores de predicción. Este comportamiento confirma observaciones realizadas en otras especies forestales, donde las funciones exponenciales simples tienden a describir con menor precisión procesos de crecimiento que presentan una marcada desaceleración en edades avanzadas (Avery y Burkhart, 2002).

Entre las funciones evaluadas, el modelo logístico obtuvo el mejor comportamiento global, registrando los menores valores de AIC y BIC, errores de predicción reducidos y una elevada capacidad para representar la forma sigmoidal del crecimiento dominante. Además de sus ventajas estadísticas, el modelo reprodujo adecuadamente la dinámica biológica observada en la BNIS-JN, caracterizada por una fase inicial de crecimiento acelerado, seguida por un incremento sostenido y una estabilización progresiva en edades avanzadas, sin generar comportamientos artificiales fuera del rango observado.

La selección del modelo logístico también presenta ventajas desde el punto de vista silvicultural. Su estructura matemática permite construir familias de curvas

anamórficas con elevada estabilidad numérica, facilitando la clasificación de la productividad de los sitios y la comparación entre rodales de diferentes edades. Estas características han favorecido su utilización en el desarrollo de índices de sitio para numerosas especies forestales alrededor del mundo (Burkhart y Tomé, 2012; Clutter et al., 1983).

En consecuencia, el modelo logístico fue adoptado como función base para desarrollar la propuesta preliminar de índice de sitio de alcance nacional para *J. neotropica* en Ecuador. A partir de esta función se construyó la curva guía y posteriormente una familia de curvas anamórficas referidas a una edad base de 30 años.

Este resultado constituye uno de los principales aportes metodológicos de la presente investigación. Mientras los estudios previos sobre la especie se limitaron a desarrollar ecuaciones locales de crecimiento para plantaciones específicas (López, 2023; Palacios et al., 2017), el modelo obtenido en este estudio integra información procedente de múltiples regiones ecológicas y sistemas de establecimiento, proporcionando por primera vez una herramienta de aplicación nacional para evaluar el potencial productivo de *J. neotropica*.

Una vez seleccionado el modelo logístico, fue posible estimar la trayectoria media de crecimiento dominante para la especie y definir la curva guía nacional correspondiente a la edad base de 30 años. Esta curva constituye el eje central del índice de sitio, ya que sirve como referencia para construir las diferentes clases de productividad y comparar el comportamiento de los rodales establecidos bajo distintas condiciones ambientales y de manejo. Los resultados del ajuste y la interpretación silvicultural de esta curva se presentan en el apartado siguiente.

12.2.8.4 Curva guía nacional del índice de sitio de J. neotropica

Una vez seleccionado el modelo logístico como la función con mejor desempeño estadístico y coherencia biológica, se procedió a desarrollar la **curva guía nacional** del índice de sitio para *J. neotropica*. En biometría forestal, la curva guía representa la trayectoria promedio de crecimiento dominante esperada para una especie bajo condiciones medias de productividad y constituye el eje de referencia a partir del cual se construyen las diferentes clases de calidad de sitio (Avery y Burkhart, 2002; Clutter et al., 1983).

Desde el punto de vista conceptual, la curva guía no describe el crecimiento observado de un árbol individual ni de un rodal específico, sino el comportamiento medio derivado del conjunto de observaciones que integran la base de datos utilizada para el ajuste del modelo. En consecuencia, representa una síntesis del potencial productivo promedio de la especie dentro del rango de condiciones ecológicas consideradas durante la construcción de la BNIS-JN.

La curva guía nacional fue desarrollada utilizando los 78 árboles dominantes incorporados en la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN), distribuidos en diferentes provincias y sistemas de establecimiento del Ecuador. El modelo logístico seleccionado

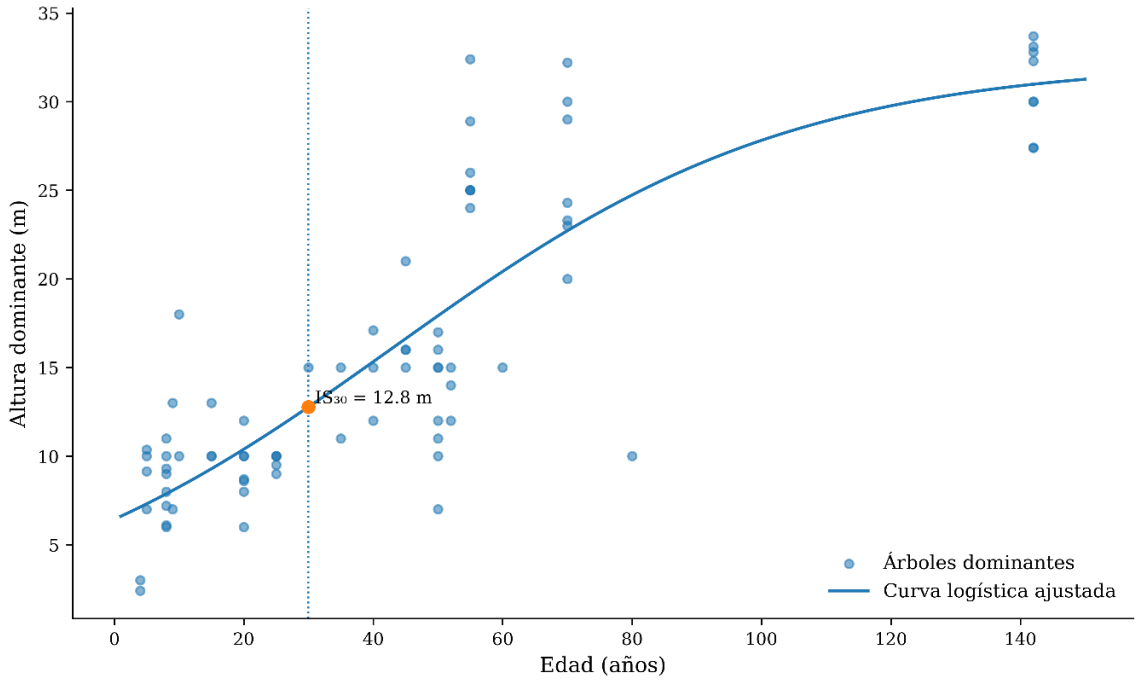
permitió describir adecuadamente la trayectoria sigmoidal característica del crecimiento dominante, reproduciendo una fase inicial de incremento acelerado, seguida por un período de crecimiento sostenido y una desaceleración progresiva conforme aumenta la edad.

La edad base adoptada para el desarrollo del índice de sitio fue de **30 años**, edad en la cual la altura dominante estimada por la curva guía corresponde al índice de sitio medio nacional. Este valor constituye el punto de referencia para la construcción de las curvas de productividad y la clasificación preliminar de calidad de sitio desarrolladas en los apartados siguientes.

La Figura 12.22 presenta la curva guía nacional obtenida mediante el modelo logístico ajustado para *J. neotropica*, mostrando simultáneamente la distribución de los árboles dominantes utilizados durante el proceso de modelación.

Figura 12.22

Curva guía nacional del índice de sitio para Juglans neotropica en Ecuador



Nota. La curva guía nacional fue ajustada mediante el modelo logístico utilizando la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN). Los puntos representan los árboles dominantes incorporados en la modelación y la línea continua corresponde a la trayectoria media de crecimiento dominante estimada para la especie. La línea vertical identifica la edad base adoptada (30 años), utilizada como referencia para el desarrollo de las curvas nacionales de índice de sitio.

La Figura 12.22 evidencia que el modelo logístico reproduce satisfactoriamente el patrón de crecimiento observado para *J. neotropica*. Durante las primeras décadas de desarrollo, la altura dominante aumenta rápidamente como resultado del elevado vigor juvenil característico de la especie. Posteriormente, la tasa de crecimiento disminuye gradualmente, aproximándose de forma asintótica a una altura máxima potencial, comportamiento que coincide con la dinámica descrita para numerosas especies forestales de larga vida (Burkhart y Tomé, 2012; Pretzsch, 2009).

La distribución de los registros alrededor de la curva guía también refleja la considerable variabilidad existente entre sitios, atribuible a diferencias en altitud, precipitación, fertilidad del suelo, competencia y manejo silvicultural. No obstante, la dispersión observada no altera la tendencia general del crecimiento dominante, lo que confirma la capacidad del modelo para sintetizar la respuesta promedio de la especie a escala nacional.

Desde el punto de vista práctico, la curva guía constituye el principal instrumento para interpretar la productividad potencial de un rodal. Aquellos rodales cuya altura dominante se ubica por encima de la curva presentan condiciones de crecimiento superiores al promedio nacional, mientras que los rodales situados por debajo reflejan limitaciones ambientales o de manejo que reducen el desarrollo de la especie. Esta interpretación facilita la comparación entre sitios de diferentes edades y proporciona una base objetiva para la toma de decisiones silviculturales relacionadas con el establecimiento de plantaciones, la restauración ecológica y el manejo forestal.

La construcción de una curva guía de alcance nacional constituye un avance metodológico para la evaluación comparativa de la productividad en altura dominante de *J. neotropica* en Ecuador. Su interpretación debe considerar el carácter integrado y transversal de la información utilizada y la necesidad de validación con datos longitudinales e independientes.

Asimismo, la utilización de una base de datos armonizada permitió reducir las diferencias metodológicas existentes entre investigaciones previas, proporcionando una representación más robusta del crecimiento dominante y mejorando la capacidad de generalización del modelo. Este enfoque fortalece la aplicabilidad del índice de sitio tanto en investigaciones futuras como en programas de manejo forestal, restauración ecológica y planificación territorial.

Sin embargo, la curva guía representa únicamente la productividad promedio de la especie. Para clasificar los rodales según diferentes niveles de calidad de sitio resulta necesario desarrollar una familia de curvas que represente distintos niveles de productividad alrededor de esta trayectoria central. Dichas curvas permiten estimar el potencial de crecimiento de un rodal específico mediante la comparación de su altura dominante con las trayectorias de referencia, constituyendo la base operativa del índice de sitio utilizado en la práctica silvícola.

Por esta razón, a partir del modelo logístico seleccionado y de la curva guía se desarrolló una familia preliminar de curvas anamórficas de índice de sitio para *J. neotropica*, presentada en el apartado siguiente.

La curva guía desarrollada en este estudio proporciona una referencia biométrica de alcance nacional para evaluar comparativamente la productividad en altura dominante de *J. neotropica* en Ecuador. Su utilización debe restringirse al dominio representado por la BNIS-JN y considerarse preliminar hasta disponer de validación longitudinal e independiente.

12.2.8.5 Desarrollo de las curvas nacionales del índice de sitio

Una vez definida la curva guía nacional mediante el modelo logístico, se procedió a desarrollar la familia de curvas que conforman el índice de sitio para *J. neotropica*. En silvicultura, estas curvas representan diferentes trayectorias potenciales de crecimiento dominante y permiten clasificar los rodales según la calidad productiva del sitio, constituyendo una de las herramientas más utilizadas para la planificación forestal, la evaluación del potencial de producción y la formulación de estrategias de manejo (Assmann, 1970; Clutter et al., 1983; Pretzsch, 2009).

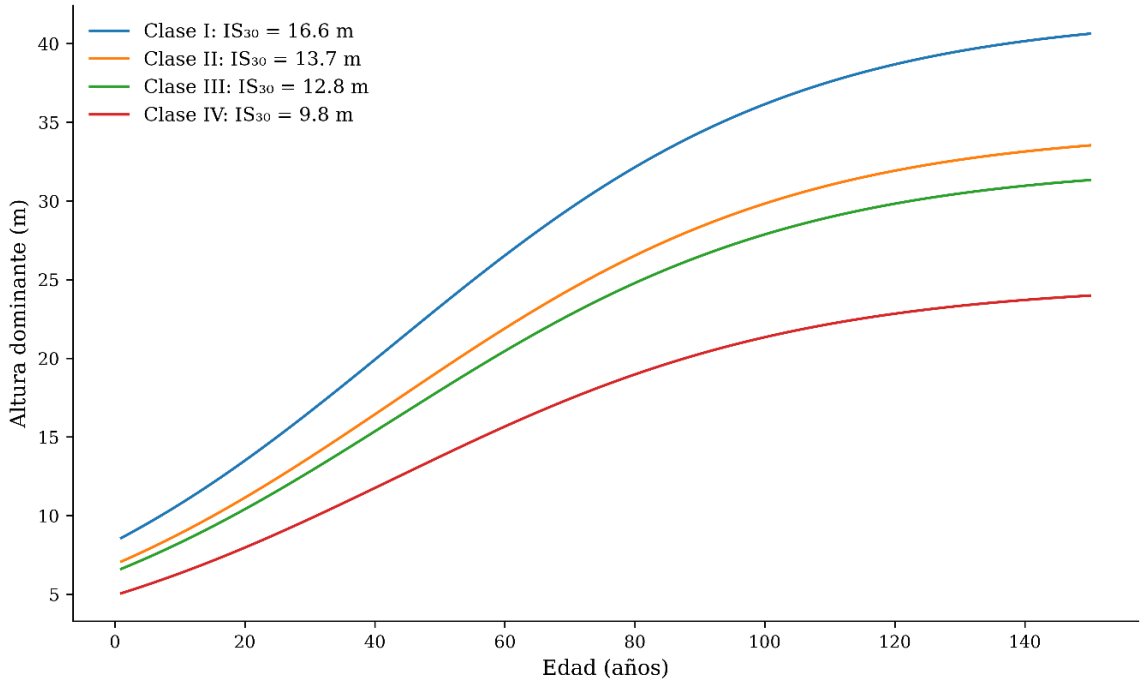
A diferencia de la curva guía, que representa el crecimiento promedio esperado de la especie, las curvas de índice de sitio describen distintos niveles de productividad alrededor de esa trayectoria central. Cada curva corresponde a una condición específica de calidad del sitio y expresa la altura dominante que alcanzaría un rodal a una edad determinada bajo un determinado potencial productivo. De esta manera, rodales con igual edad pueden clasificarse en diferentes categorías según la posición que ocupen con respecto a las curvas de referencia.

En el presente estudio, las curvas nacionales se desarrollaron a partir del modelo logístico seleccionado en el apartado anterior, utilizando como referencia la edad base de **30 años**. La construcción de las curvas siguió el enfoque anamórfico clásico empleado en biometría forestal, manteniendo la misma forma funcional de la curva guía y generando diferentes niveles de productividad mediante desplazamientos verticales derivados del índice de sitio correspondiente. Este procedimiento permitió conservar la coherencia biológica del patrón de crecimiento y facilitar la comparación entre rodales de diferentes edades.

La Figura 12.23 presenta la familia preliminar de curvas anamórficas de índice de sitio desarrollada para *J. neotropica* en Ecuador.

Figura 12.23

Curvas nacionales del índice de sitio para Juglans neotropica en Ecuador



Nota. Las curvas fueron desarrolladas a partir del modelo logístico ajustado mediante la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN), utilizando una edad base de 30 años. Cada trayectoria representa un nivel diferente de productividad potencial y constituye la base para la clasificación preliminar de calidad de sitio de *J. neotropica* en Ecuador.

La Figura 12.23 muestra la separación matemática entre las trayectorias anamórficas construidas a partir de la curva guía. Estas curvas representan niveles relativos de productividad en altura dominante y no deben interpretarse como trayectorias longitudinales observadas de rodales específicos.

Este comportamiento coincide con el descrito para numerosas especies forestales, donde la calidad del sitio ejerce un efecto acumulativo sobre el crecimiento en altura a medida que aumenta la edad del rodal (Assmann, 1970; Burkhart y Tomé, 2012). En consecuencia, las diferencias observadas entre curvas representan la expresión integrada de múltiples factores ambientales, entre ellos la disponibilidad hídrica, la fertilidad del suelo, las condiciones topográficas, la temperatura, la competencia y las prácticas de manejo implementadas durante el desarrollo del bosque.

Desde una perspectiva silvicultural, la utilización de curvas nacionales permite estimar de forma rápida la productividad potencial de un rodal mediante la comparación de su edad y altura dominante con las trayectorias de referencia. Este procedimiento constituye una herramienta objetiva para seleccionar sitios destinados al establecimiento de plantaciones, evaluar el desempeño de programas de restauración forestal, estimar el crecimiento futuro y orientar decisiones relacionadas con la intensidad de los tratamientos silviculturales.

Asimismo, las curvas desarrolladas en este estudio proporcionan una base metodológica para futuras investigaciones orientadas a la construcción de índices de sitio específicos para diferentes regiones fisiográficas o zonas ecológicas del Ecuador. Conforme se incorporen nuevos registros provenientes de parcelas permanentes y ensayos de crecimiento, será posible desarrollar modelos polimórficos que describan con mayor precisión la variabilidad regional del crecimiento dominante de la especie.

La obtención de una familia preliminar de curvas de alcance nacional amplía los antecedentes disponibles respecto a los estudios previos realizados para *J. neotropica*, los cuales se limitaron al ajuste de ecuaciones de crecimiento para condiciones locales (López, 2023; Palacios et al., 2017). En contraste, las curvas desarrolladas en esta investigación integran información proveniente de múltiples sistemas de establecimiento y diferentes regiones del país, proporcionando por primera vez una herramienta de aplicación nacional para la evaluación de la productividad potencial de la especie.

12.2.8.6 Clasificación nacional del índice de sitio de J. neotropica

Aunque el índice de sitio representa una variable continúa derivada de la relación entre la altura dominante y la edad, en la práctica forestal resulta conveniente agrupar dicha variabilidad en un número reducido de clases con significado silvicultural. Esta clasificación facilita la interpretación de las curvas de productividad, simplifica la comparación entre rodales y constituye una herramienta práctica para la planificación del manejo forestal, la restauración ecológica y la selección de áreas destinadas al establecimiento de plantaciones (Assmann, 1970; Avery y Burkhart, 2002; Burkhart y Tomé, 2012).

Con base en la curva guía nacional desarrollada en el presente estudio y considerando la distribución observada en la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN), se propone una **clasificación preliminar de cuatro clases de productividad** para *J. neotropica* en Ecuador. La adopción de cuatro categorías responde a criterios tanto estadísticos como silviculturales. Desde el punto de vista práctico, este número de clases permite diferenciar adecuadamente los principales niveles de productividad observados sin generar una complejidad excesiva para su aplicación en inventarios forestales y programas de manejo.

La clasificación propuesta toma como referencia la altura dominante esperada a la **edad base de 30 años (IS_{30})**, permitiendo comparar rodales de diferentes edades mediante una única escala nacional de productividad. La **Clase III** corresponde a la curva guía nacional y representa la productividad promedio observada en la BNIS-JN, mientras que las clases superiores e inferiores reflejan condiciones progresivamente más favorables o más limitantes para el crecimiento de la especie.

La Tabla 12.14 presenta la clasificación preliminar del índice de sitio desarrollada para *J. neotropica* en Ecuador.

Tabla 12.14

Clasificación preliminar del índice de sitio de Juglans neotropica en Ecuador (edad base: 30 años)

Clase de sitio	IS_{30} (m)	Nivel de productividad	Interpretación silvicultural
I	**16,6**	Muy alta	Sitios con productividad relativa muy alta en altura dominante dentro de la clasificación propuesta.
II	**13,7**	Alta	Sitios con productividad relativa alta y crecimiento dominante superior a la referencia media.
III	**11,3**	Media	Sitios con productividad relativa media; corresponde a la trayectoria de referencia definida por la curva guía.
IV	**9,8**	Baja	Sitios con productividad relativa baja en altura dominante; requieren evaluar las limitaciones ambientales y de manejo antes de definir el objetivo silvicultural.

Nota. La clasificación preliminar del índice de sitio fue desarrollada a partir de la curva guía nacional obtenida mediante la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN), utilizando una edad base de 30 años. Los valores representan la altura dominante esperada para cada nivel de productividad y constituyen la primera propuesta nacional de clasificación del índice de sitio para *J. neotropica* en Ecuador. La clasificación deberá validarse y refinarse conforme se incorporen nuevos registros provenientes de parcelas permanentes y ensayos de crecimiento distribuidos en diferentes regiones ecológicas del país.

La clasificación propuesta evidencia que el crecimiento potencial de *J. neotropica* puede variar considerablemente entre sitios, incluso cuando los rodales presentan edades similares. Esta variabilidad refleja la influencia integrada de factores ambientales como la altitud, la disponibilidad hídrica, las propiedades físicas y químicas del suelo, la exposición topográfica y las condiciones microclimáticas, así como de factores de manejo relacionados con la competencia, la densidad inicial de plantación y las intervenciones silviculturales realizadas durante el desarrollo del bosque (Pretzsch, 2009).

Los sitios clasificados en la **Clase I** representan ambientes con una elevada capacidad productiva, donde la especie alcanza las mayores alturas dominantes y presenta el mayor potencial para la producción de madera de alto valor. Estos sitios constituyen áreas prioritarias para el establecimiento de plantaciones comerciales y sistemas agroforestales intensivos, en los cuales las inversiones en podas, raleos y manejo de la calidad del fuste pueden traducirse en mayores rendimientos económicos.

La **Clase II** agrupa sitios con una productividad superior al promedio nacional y un comportamiento silvícola favorable. Aunque el crecimiento dominante es ligeramente inferior al observado en la Clase I, estos ambientes continúan ofreciendo condiciones apropiadas para programas de reforestación, restauración productiva y producción maderable, particularmente cuando se aplican prácticas adecuadas de manejo.

La **Clase III** corresponde a la productividad media representada por la curva guía nacional. Desde el punto de vista metodológico, esta categoría constituye el eje de referencia del índice de sitio y representa las condiciones de crecimiento predominantes observadas en la BNIS-JN. En términos silviculturales, estos sitios permiten el establecimiento de plantaciones y sistemas agroforestales con rendimientos compatibles con los valores promedio registrados para la especie en Ecuador.

Finalmente, la **Clase IV** reúne aquellos sitios donde el crecimiento dominante resulta inferior al promedio nacional debido a limitaciones ambientales o de manejo. En estas condiciones, la productividad puede incrementarse parcialmente mediante prácticas de mejoramiento del sitio; sin embargo, en muchos casos resulta más conveniente orientar el manejo hacia objetivos de restauración ecológica, protección de cuencas hidrográficas o conservación de la biodiversidad, donde los servicios ecosistémicos adquieren mayor relevancia que la producción de madera.

Desde una perspectiva operativa, la clasificación propuesta facilita la interpretación de las curvas nacionales del índice de sitio y constituye una herramienta para apoyar la toma de decisiones en programas de establecimiento de plantaciones, restauración forestal, manejo silvicultural y ordenamiento territorial. Además, proporciona una referencia común para comparar investigaciones desarrolladas en diferentes regiones del país, favoreciendo la estandarización de los estudios de crecimiento de *J. neotropica*.

Es importante señalar que la presente clasificación debe entenderse como una **propuesta preliminar**, sustentada en la mejor información actualmente disponible para la especie. Conforme se amplíe la cobertura geográfica de la BNIS-JN y se incorporen nuevos datos provenientes de parcelas permanentes de monitoreo, será posible refinar los límites entre clases, desarrollar modelos regionales y evaluar la conveniencia de utilizar curvas polimórficas específicas para diferentes condiciones ecológicas.

La clasificación propuesta debe considerarse una referencia preliminar de productividad relativa en altura dominante. Su aplicación práctica requiere integrarse con información sobre suelo, clima, disponibilidad hídrica, densidad, sanidad, objetivos productivos y demás condiciones relevantes del sitio y del manejo.

12.2.8.7 Aplicaciones silviculturales del índice de sitio

El desarrollo del primer índice de sitio para *J. neotropica* en Ecuador trasciende la obtención de una herramienta de modelación del crecimiento y constituye una base objetiva para la planificación del manejo forestal, la restauración ecológica y la conservación de la especie. En términos prácticos, el índice de sitio permite estimar la productividad potencial de un rodal a partir de la relación entre la altura dominante y la edad, proporcionando un criterio estandarizado para comparar sitios con diferentes condiciones ambientales y de manejo (Assmann, 1970; Burkhart y Tomé, 2012).

Una de las aplicaciones más importantes corresponde a la **selección de sitios para el establecimiento de plantaciones forestales**. La clasificación propuesta permite identificar áreas con elevado potencial productivo, donde la inversión en material genético de alta calidad, prácticas silviculturales intensivas y manejo orientado a la producción de madera de alto valor presenta mayores probabilidades de éxito económico. De igual manera, facilita reconocer sitios con productividad intermedia o baja, donde los objetivos de manejo pueden orientarse preferentemente hacia la restauración ecológica, la recuperación de paisajes degradados o la provisión de servicios ecosistémicos.

El índice de sitio también constituye una herramienta para **optimizar el manejo silvicultural** durante el desarrollo de los rodales. La clasificación de productividad permite ajustar la intensidad de las podas de formación, la oportunidad de los raleos, la densidad final de plantación y la programación de los aprovechamientos, de acuerdo con el potencial de crecimiento esperado en cada sitio. Este enfoque favorece una utilización más eficiente de los recursos y contribuye a maximizar la calidad tecnológica del fuste y el rendimiento maderable.

Desde la perspectiva de la restauración forestal, el índice de sitio proporciona un criterio técnico para priorizar áreas de intervención y seleccionar estrategias de establecimiento acordes con la capacidad productiva del terreno. En sitios clasificados como de productividad baja, el objetivo principal puede orientarse hacia la recuperación de funciones ecológicas y la protección del suelo y del recurso hídrico, mientras que en sitios de productividad media o alta resulta posible combinar objetivos de restauración con producción sostenible de madera y otros bienes forestales.

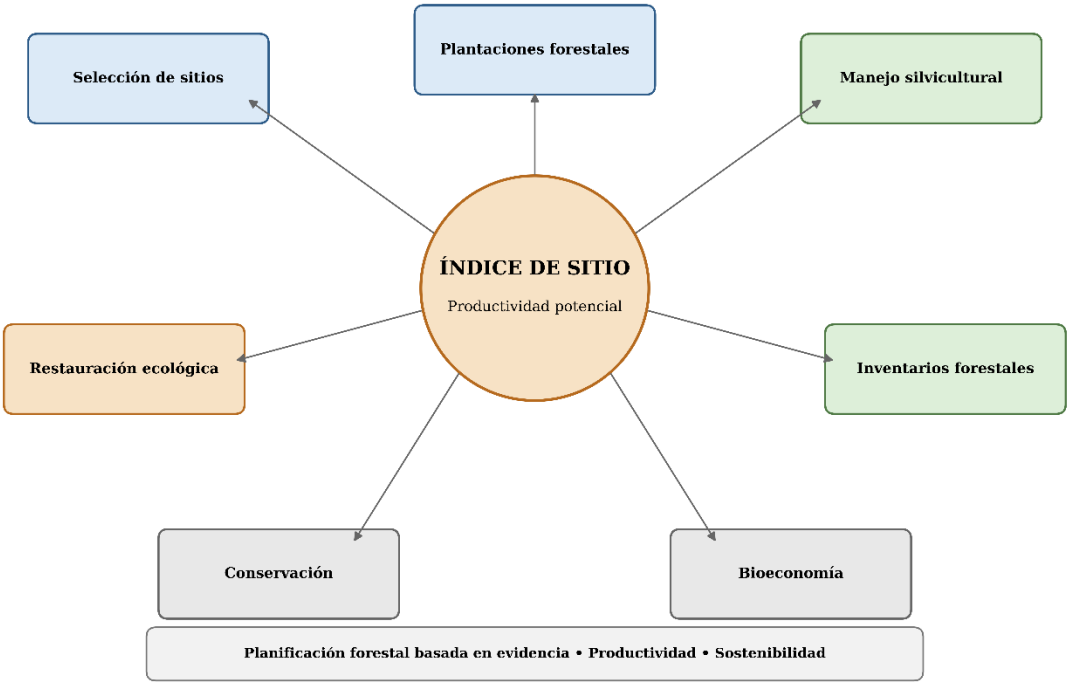
Asimismo, el índice de sitio representa una herramienta de apoyo para los **inventarios forestales nacionales y regionales**, permitiendo incorporar la calidad productiva del sitio como una variable adicional para la interpretación de la estructura y el crecimiento de los rodales. La integración de esta información con variables como el diámetro, la altura, el volumen y el índice de aprovechamiento del fuste posibilita una evaluación más completa del potencial forestal de *J. neotropica*.

En el contexto de la bioeconomía forestal, la clasificación del índice de sitio facilita la identificación de áreas con mayor potencial para el desarrollo de cadenas de valor basadas en la producción de madera de alta calidad, sistemas agroforestales y mecanismos de compensación por servicios ecosistémicos. De esta manera, la productividad potencial del sitio deja de ser únicamente un atributo ecológico y se convierte en un elemento estratégico para la planificación territorial y el diseño de políticas públicas orientadas al manejo sostenible de los paisajes andinos.

La Figura 12.24 sintetiza las principales aplicaciones silviculturales derivadas del índice de sitio desarrollado para *J. neotropica*.

Figura 12.24

Aplicaciones silviculturales del índice de sitio para Juglans neotropica en Ecuador



Nota. El índice de sitio constituye una herramienta para estimar la productividad potencial de *J. neotropica* y apoyar la toma de decisiones relacionadas con el establecimiento de plantaciones, el manejo silvicultural, la restauración ecológica, los inventarios forestales, la conservación y la planificación bioeconómica del territorio.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que el crecimiento dominante de *J. neotropica* puede describirse adecuadamente mediante funciones de crecimiento no lineales ampliamente utilizadas en biometría forestal. La selección del modelo logístico coincide con numerosos trabajos desarrollados para especies forestales templadas y tropicales, en los cuales esta función ha demostrado una elevada capacidad para representar trayectorias sigmoides de crecimiento y generar curvas de índice de sitio con comportamiento biológicamente consistente (Burkhart y Tomé, 2012; Clutter et al., 1983; Pretzsch, 2009).

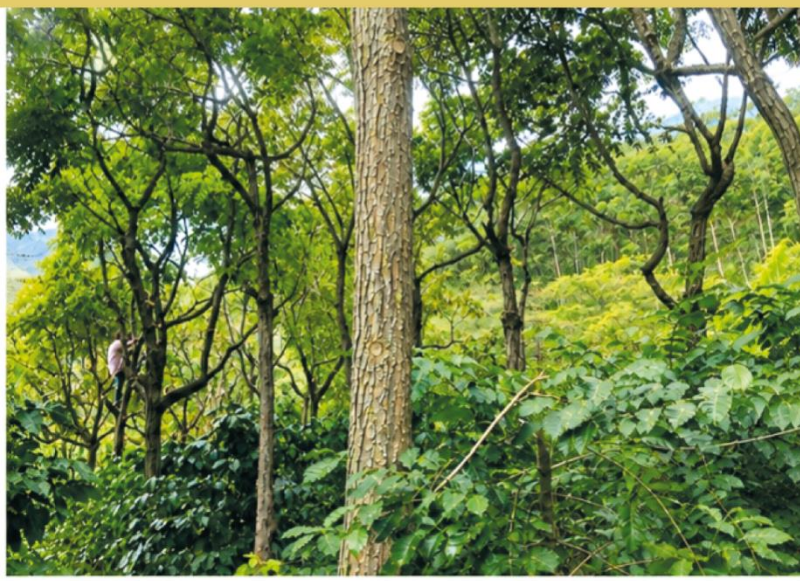
A diferencia de los estudios previos realizados en Ecuador, que desarrollaron ecuaciones locales de crecimiento a partir de una única plantación o de un sistema agroforestal específico (López, 2023; Palacios et al., 2017), la presente investigación integra información procedente de diferentes provincias, condiciones ambientales y sistemas de establecimiento mediante la construcción de la Base Nacional de Índice de Sitio (BNIS-JN). Esta integración, acompañada de procedimientos de auditoría y armonización de la información, permitió mejorar la comparabilidad entre registros procedentes de diferentes investigaciones y generar una representación más amplia del potencial de crecimiento de la especie.

El desarrollo de una curva guía nacional y de una clasificación preliminar de productividad constituye un avance metodológico importante para la silvicultura del nogal andino. Aunque la clasificación propuesta deberá ser refinada conforme se incorporen nuevos registros provenientes de parcelas permanentes y programas de monitoreo de largo plazo, representa un punto de partida sólido para estandarizar la evaluación de la calidad del sitio en futuros estudios sobre crecimiento y producción.

Debe señalarse, sin embargo, que la BNIS-JN todavía presenta limitaciones relacionadas con la cobertura geográfica y la disponibilidad de árboles dominantes en determinadas regiones del país. La ampliación progresiva de la base de datos permitirá desarrollar en el futuro modelos específicos para diferentes regiones fisiográficas, evaluar la conveniencia de curvas polimórficas e incorporar variables ambientales adicionales, como propiedades del suelo, balance hídrico y características topográficas, incrementando así la precisión del índice de sitio.

A pesar de estas limitaciones, el enfoque metodológico desarrollado muestra la posibilidad de integrar información procedente de múltiples investigaciones para construir bases y herramientas biométricas de alcance nacional. En este contexto, la BNIS-JN complementa la Base Nacional Dasométrica Integrada (BNDI-JN), la Base Nacional Volumétrica (BNV-JN-V2) y la Base Analítica de Arquitectura de Copa (BAC-JN), conformando un conjunto integrado de información biométrica desarrollado específicamente para *J. neotropica* en Ecuador. Su ampliación y validación progresivas permitirán fortalecer estas herramientas y avanzar hacia modelos de mayor capacidad explicativa y aplicación silvicultural.

CAPÍTULO 13



Manejo silvicultural adaptativo y aprovechamiento sostenible de *Juglans neotropica*

Capítulo

13

Manejo silvicultural adaptativo y aprovechamiento sostenible de *Juglans neotropica*

A) Medición del DAP de un árbol de *J. neotropica* en una hilera utilizada como límite de terrenos, La Florida, Carchi. **B)** Árboles de *J. neotropica* sometidos a poda en un sistema agroforestal, Pimampiro, Imbabura. **C)** Aserrado y transformación primaria de madera de nogal, Guananguicho Sur, Carchi. **D)** Procesamiento de muestras de madera de *J. neotropica* para investigación tecnológica, Yuyucocha, Ibarra, Imbabura, Ecuador. Fuente de las fotografías A, C y D: Villota (2023); fotografía B: Mario Añazco.

El crecimiento de un árbol constituye la base para comprender su dinámica de desarrollo; sin embargo, el manejo silvicultural requiere transformar esa información en decisiones que orienten la conducción del rodal hacia objetivos específicos de producción, conservación y restauración. En este sentido, la información epidométrica y biométrica presentada en el capítulo anterior adquiere valor cuando se utiliza para definir intervenciones silviculturales oportunas, evaluar la respuesta del bosque y orientar el aprovechamiento sostenible de la especie.

En *Juglans neotropica*, el manejo silvicultural debe responder a la diversidad de condiciones ecológicas presentes en los paisajes andinos del Ecuador y a la multiplicidad de bienes y servicios que la especie puede generar durante su ciclo biológico. Por ello, las decisiones de manejo no pueden basarse exclusivamente en edades de corta o esquemas silvícolas rígidos, sino en un proceso de manejo adaptativo sustentado en el monitoreo del crecimiento, el estado sanitario, la calidad del sitio y los objetivos específicos de cada sistema de manejo.

Sobre esta base, el presente capítulo integra cuatro componentes complementarios. En primer lugar, analiza la aplicación de la epidometría y la modelación del crecimiento como herramientas para la toma de decisiones silviculturales. Posteriormente, desarrolla estrategias de manejo para diferentes objetivos y contextos productivos, aborda el manejo sanitario desde una perspectiva adaptativa y, finalmente, presenta los criterios para el aprovechamiento sostenible de *Juglans neotropica*, culminando con un modelo integrado que articula la producción de madera, los productos forestales no madereros y los servicios ecosistémicos bajo los principios del Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM).

13.1. Epidometría y modelación del crecimiento aplicada al manejo silvicultural de *J. neotropica*

La epidometría constituye una de las herramientas cuantitativas fundamentales de la silvicultura, ya que permite describir, modelar e interpretar el crecimiento de los árboles mediante relaciones matemáticas entre la edad y variables dasométricas como la altura, el diámetro normal (DAP), el área basal, el volumen y el desarrollo de la copa. A partir de estos modelos es posible estimar el Incremento Medio Anual (IMA) y el Incremento Corriente Anual (ICA), identificar la culminación del crecimiento medio y establecer criterios técnicos para la programación de podas, raleos, liberaciones y la evaluación del turno biológico de los rodales.

En el presente estudio se estructuró una Base Nacional Epidométrica (BNE-JN) como base analítica derivada e integrada a partir de la información biométrica consolidada por el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). La BNE-JN reúne registros de 76 localidades distribuidas en diferentes provincias del Ecuador y conserva la trazabilidad con las bases descritas en el capítulo 12. Debido a que las variables no estuvieron disponibles para todos los individuos, cada relación epidométrica se ajustó exclusivamente con las observaciones que contaban con las variables requeridas y superaron los respectivos controles de calidad.

13.1.1 Base Nacional Epidométrica

La Base Nacional Epidométrica de *J. neotropica* integra información procedente de bosques naturales, plantaciones forestales, sistemas agroforestales, arbolado urbano y ensayos experimentales establecidos en diferentes regiones de los Andes ecuatorianos (Tabla 13.1).

La información fue sometida a un proceso de depuración y control de calidad mediante la verificación de la consistencia de las variables dasométricas, la identificación de registros atípicos y la evaluación de la representatividad de los diferentes sistemas de manejo. Debido a que la información corresponde a una cronosecuencia nacional y no a una red de parcelas permanentes de largo plazo, las curvas obtenidas deben interpretarse como modelos de referencia para apoyar el manejo silvicultural de *J. neotropica* y no como funciones universales de producción. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado cuando no existen parcelas permanentes de largo plazo, permitiendo aproximar la trayectoria promedio de crecimiento mediante sustitución espacial por edades.

Tabla 13.1

Caracterización descriptiva de la Base Nacional Epidométrica de Juglans neotropica utilizada para el ajuste de los modelos de crecimiento

Variable	Unidad	n	Mínimo	Promedio	Mediana	Máximo	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
Edad	años	260	0,50	28,63	24,00	142,00	23,84	83,3
DAP	cm	217	3,00	30,27	26,41	138,78	21,67	71,6
Altura total	m	255	0,27	10,63	9,30	75,00	8,31	78,2
Altura dominante	m	78	2,40	15,87	15,10	33,70	6,43	40,5
Área basal individual	m^2 $árbol^{-1}$	217	0,0007	0,1057	0,0548	1,5127	0,1785	168,9
Volumen total individual	m^3 $árbol^{-1}$	1 692	0,0013	1,4332	0,6241	41,5600	2,8436	198,4
Volumen comercial individual	m^3 $árbol^{-1}$	1 582	0,0010	0,7484	0,2915	11,9300	1,2765	170,6
Área de copa	m^2	133	0,20	30,74	24,91	176,71	28,11	91,4

Nota. La base de datos fue desarrollada durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). Los tamaños muestrales difieren entre variables debido a la disponibilidad específica de información para cada análisis, ya que los registros proceden de múltiples fuentes y no todas las variables estuvieron disponibles para todos los individuos.

Los estadísticos descriptivos muestran una elevada variabilidad en la mayoría de las variables dasométricas, con coeficientes de variación superiores al 70 % en diámetro, altura total, área basal y volumen. Este comportamiento refleja la amplitud del gradiente de edades, condiciones ecológicas y sistemas de manejo incluidos en la base de datos, constituyendo una fortaleza para el ajuste de funciones nacionales de crecimiento al incorporar una amplia diversidad de condiciones de desarrollo de la especie. La cobertura geográfica de la base se resume en la Tabla 13.2, mientras que el detalle de las localidades utilizadas para el modelamiento se presenta en la Tabla 13.3.

Tabla 13.2

Cobertura geográfica y representatividad de la Base Nacional Epidométrica de Juglans neotropica

Componente	Valor
Provincias representadas	14
Sitios de muestreo georreferenciados	76
Bosques naturales	18
Plantaciones forestales	24
Sistemas agroforestales	16
Arbolado urbano	12
Otros sistemas experimentales	6
Intervalo altitudinal	1 650–3 250 m
Intervalo de edades	0,5–142 años
Registros totales integrados	> 2 000

Nota. La información procede de parcelas permanentes, parcelas temporales, inventarios forestales, plantaciones experimentales y árboles aislados distribuidos en la región andina del Ecuador. La diversidad de condiciones ecológicas proporciona una cronosecuencia nacional adecuada para el ajuste preliminar de modelos de crecimiento.

La Tabla 13.3 presenta la procedencia geográfica de los registros utilizados para el ajuste de los modelos epidométricos. La distribución espacial de estas localidades corresponde al patrón nacional de ocurrencia de *J. neotropica* presentado en el capítulo 5 (Figura 5.1), por lo que no se reproduce nuevamente en este capítulo.

Tabla 13.3

Procedencia geográfica de los registros utilizados para construir la Base Nacional Epidométrica de Juglans neotropica

Provincia	Localidades principales	Tipo de sistema	Variables utilizadas
Imbabura	Yuyucocha, Natabuela, Pimampiro, Cananvalle	Plantaciones, SAF, arbolado urbano	Edad, DAP, altura, volumen, copa
Loja	El Tundo, La Argelia	Bosque natural, plantaciones	DAP, altura, volumen
Chimborazo	Tunshi	Plantación experimental	DAP, altura
Pichincha	Quito	Arbolado urbano	DAP, altura
Carchi	San Pedro de Huaca	Plantación lineal	DAP
Cotopaxi	Salcedo	Plantación	DAP
Tungurahua	Cevallos	Plantación lineal	DAP
Azuay	Cuenca	Arbolado urbano	DAP, altura
Cañar	Cañar	Arbolado urbano	DAP
El Oro	Piñas	SAF	DAP
Napo	Cuyuja	Bosque montano	DAP
Santo Domingo	La Favorita	Plantación	DAP
Zamora Chinchipe	Valladolid/Palanda	Bosque natural	DAP, altura
Bolívar	Las Palmas	Sistema Agroforestal	DAP, altura

Nota. La distribución espacial completa de estas localidades y el rango de distribución nacional de *J. neotropica* se presentan en la Figura 5.1 del capítulo 5.

La BNE-JN constituye una integración analítica de información epidométrica de *J. neotropica* procedente de diferentes localidades y sistemas de establecimiento del Ecuador y proporciona la base cuantitativa utilizada en este capítulo para explorar patrones de crecimiento y derivar indicadores de apoyo al manejo silvicultural.

13.1.2 Modelación del crecimiento

Las relaciones entre la edad y las principales variables dasométricas fueron ajustadas mediante regresión no lineal utilizando funciones ampliamente empleadas en biometría y modelación del crecimiento forestal (Avery & Burkhart, 2015; Pretzsch, 2009). Los parámetros fueron estimados mediante mínimos cuadrados no lineales. Para cada variable se evaluaron diversos modelos candidatos y la selección final consideró simultáneamente el coeficiente de determinación ajustado (R^2aj), el error cuadrático medio (RMSE), los criterios de información de Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC), el análisis de residuos y la coherencia biológica de las funciones (Tabla 13.4).

Dado que las diferentes variables dasométricas describen procesos de crecimiento con comportamientos biológicos distintos, no existe un único modelo matemático capaz de representar adecuadamente todas las relaciones edad–variable. En consecuencia, para cada variable se seleccionó el modelo que ofreció la mejor combinación entre desempeño estadístico y coherencia biológica. La Tabla 13.4 resume los modelos finalmente seleccionados y los principales criterios que sustentaron su elección.

Tabla 13.4

Comparación de los modelos candidatos evaluados para la construcción de las curvas nacionales de crecimiento de Juglans neotropica

Variable	Modelo seleccionado	Criterio principal de selección	R^2 ajustado	RMSE	Interpretación
Altura dominante	Schumacher	Coherencia biológica y convergencia al origen.	0,67	4,73	Describe adecuadamente el crecimiento longitudinal.
DAP	Schumacher	Coherencia biológica y estabilidad de la derivada.	0,54	16,55	Adecuado para derivar IMA e ICA diamétricos.
Área basal individual	Derivado del modelo diamétrico	Consistencia matemática.	—	—	Calculado a partir del DAP modelado.
Área de copa	Weibull	Mejor ajuste estadístico.	0,20	26,11	Describe la expansión lateral de la copa.
Volumen total individual	Modelo combinado	Mayor capacidad predictiva.	0,98	0,33	Excelente ajuste para estimar producción total.
Volumen comercial individual	Modelo cuadrático	Mejor ajuste estadístico.	0,84	0,35	Adecuado para estimar producción comercial.

Nota. Se evaluaron los modelos Schumacher, Chapman–Richards, Gompertz, Logístico, Weibull y Hossfeld IV para las relaciones edad–variable, así como modelos lineales, potenciales, exponenciales, cuadráticos y combinados para las relaciones diámetro–volumen. La tabla presenta el modelo finalmente seleccionado para cada variable y el principal criterio técnico que sustentó su elección.

La comparación estadística evidenció que ningún modelo presentó el mejor desempeño para todas las variables analizadas. En consecuencia, los modelos finalmente seleccionados correspondieron a aquellos que ofrecieron el mejor compromiso entre precisión estadística y comportamiento biológicamente consistente para cada variable dasométrica

Las funciones y parámetros seleccionados para la modelación del crecimiento de *J. neotropica* se presentan en la Tabla 13.5.

Tabla 13.5

Funciones matemáticas y parámetros estimados para la modelación del crecimiento de Juglans neotropica

Variable modelada	Modelo o relación utilizada	Función ajustada	Parámetros estimados	Unidad de la variable dependiente
Altura dominante en función de la edad	Schumacher	$H_d(t) = a\,e^{-b/t}$	$a = 28{,}03199$; $b = 17{,}02308$	m
DAP en función de la edad	Schumacher	$D(t) = a\,e^{-b/t}$	$a = 61{,}85241$; $b = 10{,}43332$	cm
Área basal individual en función de la edad	Derivada del DAP modelado	$g(t) = \frac{\pi[D(t)]^2}{40\,000}$	Se utilizan los parámetros de la función edad–DAP	m² árbol⁻¹
Área de copa en función de la edad	Weibull	$AC(t) = a\left[1 - e^{-(t/b)^c}\right]$	$a = 38{,}50799$; $b = 6{,}76778$; $c = 3{,}74247$	m²
Volumen total individual en función del DAP	Combinado potencial–exponencial	$V_t(D) = aD^b e^{cD}$	$a = 0{,}0001462244$; $b = 2{,}57298$; $c = -0{,}000825394$	m³ árbol⁻¹
Volumen comercial individual en función del DAP	Cuadrático	$V_c(D) = a + bD + cD^2$	$a = -0{,}2746800$; $b = 0{,}0150662$; $c = 0{,}000463929$	m³ árbol⁻¹

Nota. En las ecuaciones, t representa la edad del árbol expresada en años; D, el diámetro a la altura del pecho en centímetros; H_d, la altura dominante; g, el área basal individual; AC, el área de copa; V_t, el volumen total individual; y V_c, el volumen comercial individual. El área basal se calculó a partir del DAP modelado, mientras que las curvas temporales de volumen se obtuvieron sustituyendo $D(t)$ en las respectivas funciones diámetro–volumen. En el modelo de volumen comercial, los valores matemáticos negativos correspondientes a diámetros pequeños se consideraron iguales a cero, debido a que representan árboles que todavía no han alcanzado dimensiones comercialmente aprovechables. Las funciones deben aplicarse dentro de los intervalos de edad y dimensiones representados en la Base Nacional Epidométrica y no extrapolarse sin validación independiente.

Los parámetros estimados permiten reproducir las curvas de crecimiento y derivar matemáticamente los indicadores epidométricos utilizados en los apartados siguientes. Las funciones de altura dominante y DAP describen la trayectoria temporal del crecimiento, mientras que el área basal se obtiene directamente del diámetro modelado. Para estimar la evolución del volumen con la edad, la función $D(t)$fue sustituida en los modelos de volumen total y comercial. Esta integración permitió calcular el Incremento Medio Anual y el Incremento Corriente Anual de cada variable, así como identificar sus respectivas edades de culminación.

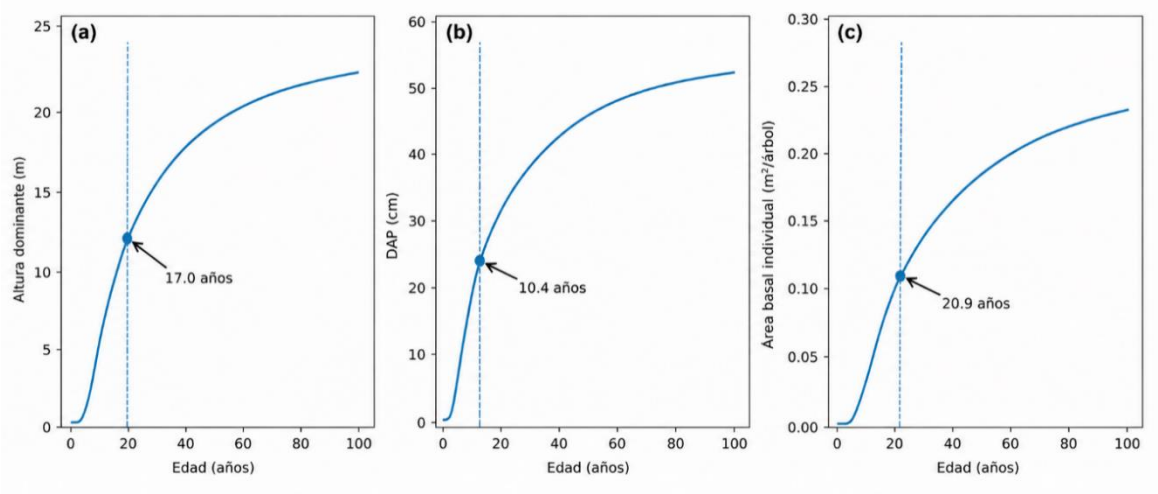
13.1.3 Curvas nacionales de crecimiento

Las funciones seleccionadas permitieron representar tendencias de crecimiento asociadas con la edad a partir de la cronosecuencia disponible, desde las etapas iniciales hasta edades avanzadas representadas en la base. Las variables modeladas presentan trayectorias diferenciadas de crecimiento acumulado, caracterizadas por cambios en la tasa de incremento conforme aumenta la edad (Figuras 13.1–13.3).

Las curvas se organizaron en tres grupos funcionales: (i) variables estructurales del árbol (altura dominante, diámetro normal y área basal individual), (ii) variables de producción (volumen comercial y volumen total individual) y (iii) desarrollo del área de copa, con el fin de facilitar su interpretación desde la perspectiva del manejo silvicultural.

Figura 13.1

Curvas nacionales de crecimiento para altura dominante, diámetro normal y área basal individual



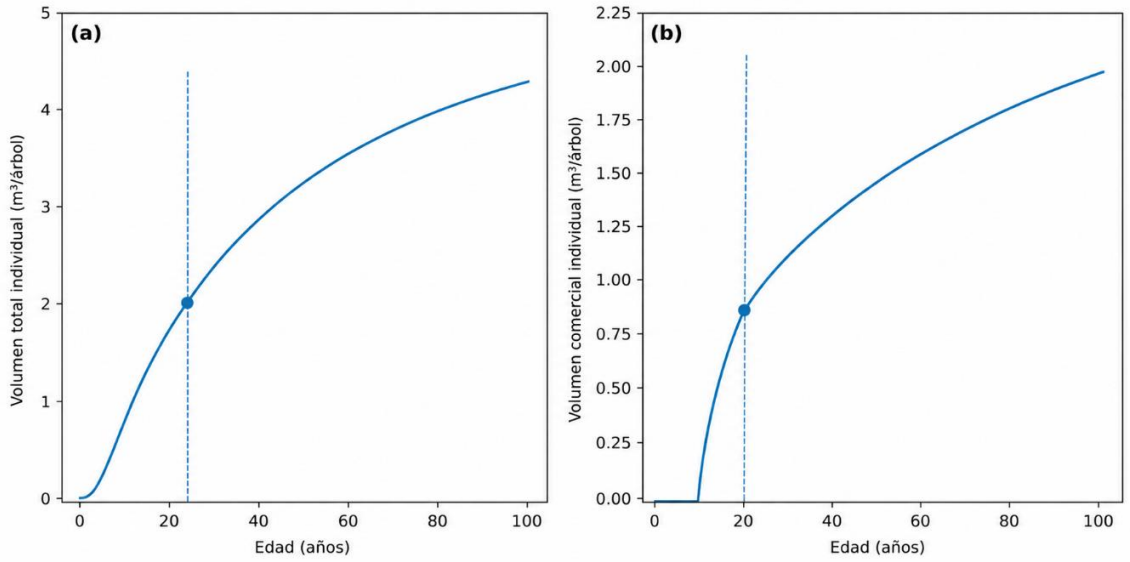
Nota. Las curvas fueron ajustadas mediante modelos no lineales seleccionados por su desempeño estadístico y coherencia biológica utilizando la Base Nacional Epidométrica de *J. neotropica*. La línea vertical indica la edad correspondiente a la culminación del Incremento Medio Anual (IMA) para cada variable. Fuente: Elaboración con base en la Base Nacional Epidométrica de *J. neotropica*, Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Las variables estructurales presentan comportamientos diferenciados, aunque estrechamente relacionados entre sí. El crecimiento en diámetro alcanza tempranamente su mayor eficiencia media, seguido por la altura dominante y posteriormente por el área basal individual. Esta secuencia refleja la transición desde un crecimiento predominantemente longitudinal, orientado a la captura de luz, hacia una fase de incremento radial en la que aumenta progresivamente la acumulación de biomasa leñosa. La culminación del IMA ocurre aproximadamente a los 10,4 años para el DAP, 17,0 años para la altura dominante y 20,9 años para el área basal individual, lo que evidencia que la producción estructural del árbol continúa intensificándose aun cuando el crecimiento diamétrico comienza a desacelerarse.

Desde la perspectiva silvicultural, estas curvas indican que las primeras intervenciones de manejo deberían programarse antes de la culminación del IMA del diámetro, cuando el incremento de la competencia entre individuos comienza a reducir la eficiencia del crecimiento.

Figura 13.2

Curvas nacionales de crecimiento del volumen comercial y del volumen total individual



Nota. Las curvas corresponden a modelos de crecimiento volumétrico derivados de las relaciones edad–diámetro y diámetro–volumen ajustadas para la Base Nacional Epidométrica de *Juglans neotropica*. La línea vertical señala la culminación del Incremento Medio Anual (IMA) para cada componente volumétrico. Fuente: Elaboración propia con base en la Base Nacional Epidométrica de *J. neotropica*, Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

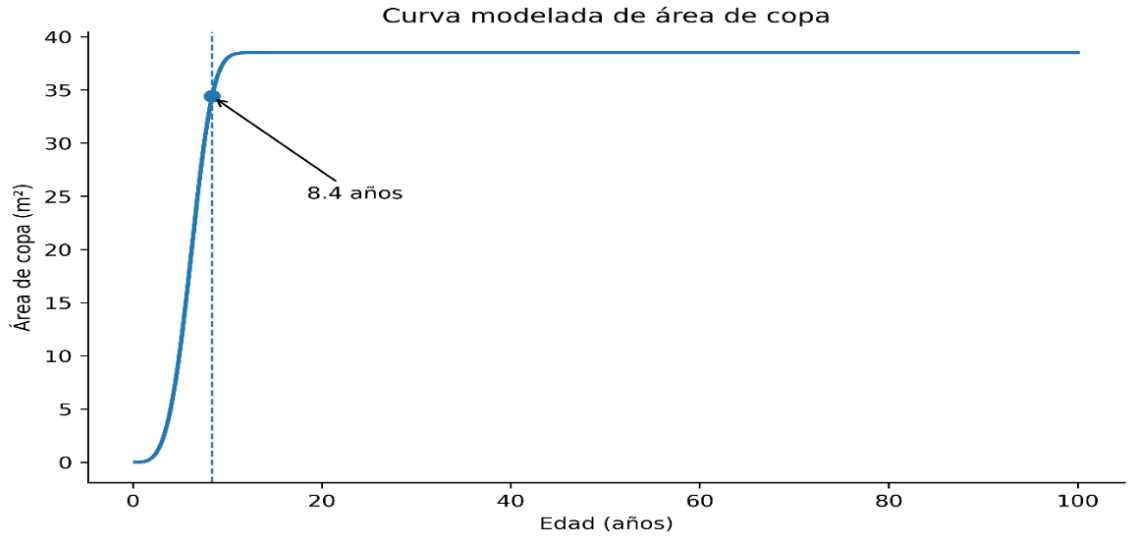
A diferencia de las variables estructurales, el crecimiento volumétrico mantiene una tendencia ascendente durante un periodo considerablemente más prolongado, reflejando la acumulación continua de biomasa y madera aprovechable. El volumen comercial alcanza la culminación del IMA alrededor de los **20,7 años**, mientras que el volumen total lo hace aproximadamente a los **26,5 años**, confirmando que la producción

de madera continúa incrementándose incluso después de que el crecimiento diamétrico ha disminuido su eficiencia media.

Estos resultados son consistentes con la dinámica de especies latifoliadas de crecimiento relativamente lento, donde la mayor producción de volumen ocurre en edades posteriores al máximo crecimiento diamétrico. En consecuencia, la culminación del IMA del volumen constituye un referente técnico para la evaluación del turno biológico, aunque su aplicación debe complementarse con criterios de calidad de sitio, densidad del rodal, objetivos de producción y condiciones económicas.

Figura 13.3

Curva nacional de expansión del área de copa



Nota. Curva ajustada mediante un modelo de crecimiento no lineal para describir la expansión del área de copa en función de la edad. La línea vertical representa la culminación del Incremento Medio Anual (IMA). Fuente: Elaboración propia con base en la Base Nacional Epidométrica de *J. neotropica*, Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

El desarrollo del área de copa constituye una de las primeras manifestaciones del crecimiento funcional del árbol, ya que determina la capacidad de interceptación de radiación y, por tanto, el potencial fotosintético del individuo. La culminación del IMA ocurre aproximadamente a los **8,4 años**, antes que en las restantes variables estructurales, lo que indica que la arquitectura aérea se consolida durante las primeras etapas del desarrollo.

Desde el punto de vista silvicultural, este comportamiento sugiere que el cierre progresivo del dosel y el inicio de la competencia por luz comienzan en edades relativamente tempranas. En consecuencia, el seguimiento del desarrollo de la copa constituye un criterio complementario para programar podas de formación y evaluar la

oportunidad del primer raleo, especialmente en plantaciones establecidas con altas densidades iniciales.

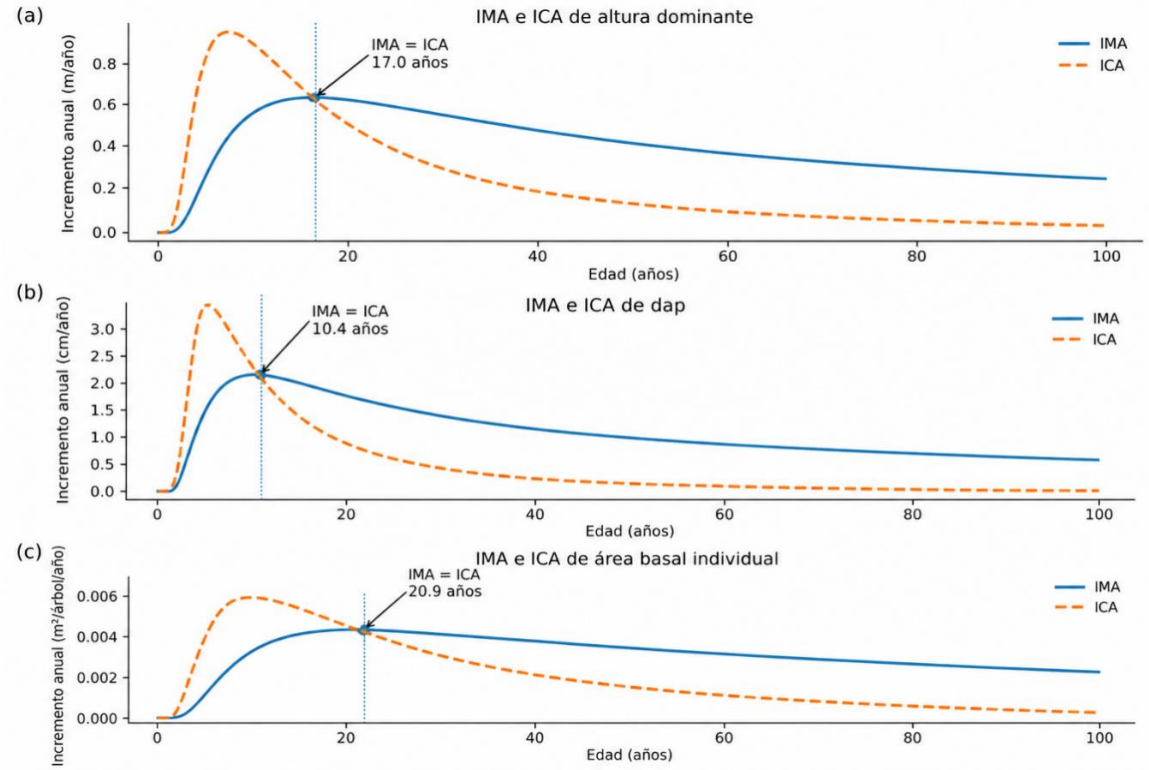
En conjunto, las curvas nacionales de crecimiento permiten comprender la secuencia temporal con la que *J. neotropica* asigna recursos al desarrollo de su arquitectura aérea, al incremento del diámetro, a la acumulación de biomasa y a la producción de volumen. Sin embargo, aunque estas funciones describen la evolución del crecimiento acumulado, no permiten identificar por sí mismas la edad de máxima eficiencia productiva. Para ello es necesario derivar los indicadores epidométricos de Incremento Medio Anual (IMA) e Incremento Corriente Anual (ICA), cuya interpretación constituye la base para la planificación de las principales intervenciones silviculturales.

13.1.4 Incremento Medio Anual (IMA) e Incremento Corriente Anual (ICA)

Las curvas de crecimiento permitieron derivar el Incremento Medio Anual (IMA) y el Incremento Corriente Anual (ICA), indicadores fundamentales para interpretar la dinámica del crecimiento de *J. neotropica* y apoyar la planificación silvicultural. El ICA representa el incremento producido durante un intervalo determinado, mientras que el IMA expresa el crecimiento promedio acumulado desde el establecimiento hasta una edad específica. La intersección entre ambas curvas corresponde a la culminación del Incremento Medio Anual, ampliamente utilizada como referencia para analizar la eficiencia del crecimiento y orientar decisiones de manejo. La Figura 13.4 muestra el comportamiento del IMA y del ICA para la altura dominante, el diámetro normal y el área basal individual.

Figura 13.4

Curvas del Incremento Medio Anual (IMA) y del Incremento Corriente Anual (ICA) para altura dominante, diámetro normal y área basal individual

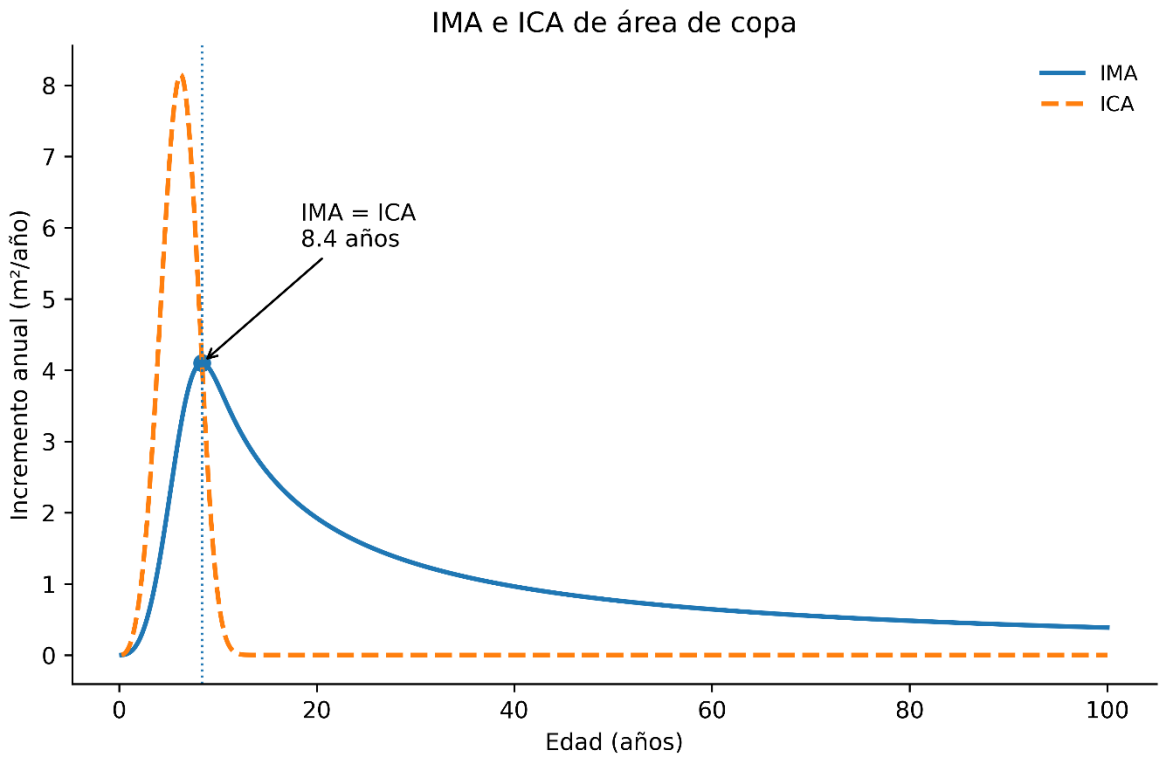


Nota. La línea continua representa el Incremento Medio Anual (IMA) y la línea discontinua el Incremento Corriente Anual (ICA). La línea vertical punteada indica la edad de culminación del IMA, correspondiente a la intersección entre ambas curvas. Las curvas fueron derivadas de los modelos de crecimiento ajustados para *J. neotropica* utilizando la Base Nacional Epidométrica del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

En las variables estructurales, las edades estimadas de culminación del IMA fueron diferentes: aproximadamente 17,0 años para altura dominante, 10,4 años para diámetro normal y 20,9 años para área basal individual. Estas diferencias muestran que los indicadores estructurales modelados no alcanzan simultáneamente su máximo incremento medio y deben interpretarse como referencias derivadas de los modelos ajustados. De manera complementaria, la Figura 13.5 presenta las curvas de IMA e ICA correspondientes al área de copa.

Figura 13.5

Curvas del Incremento Medio Anual (IMA) y del Incremento Corriente Anual (ICA) para área de copa

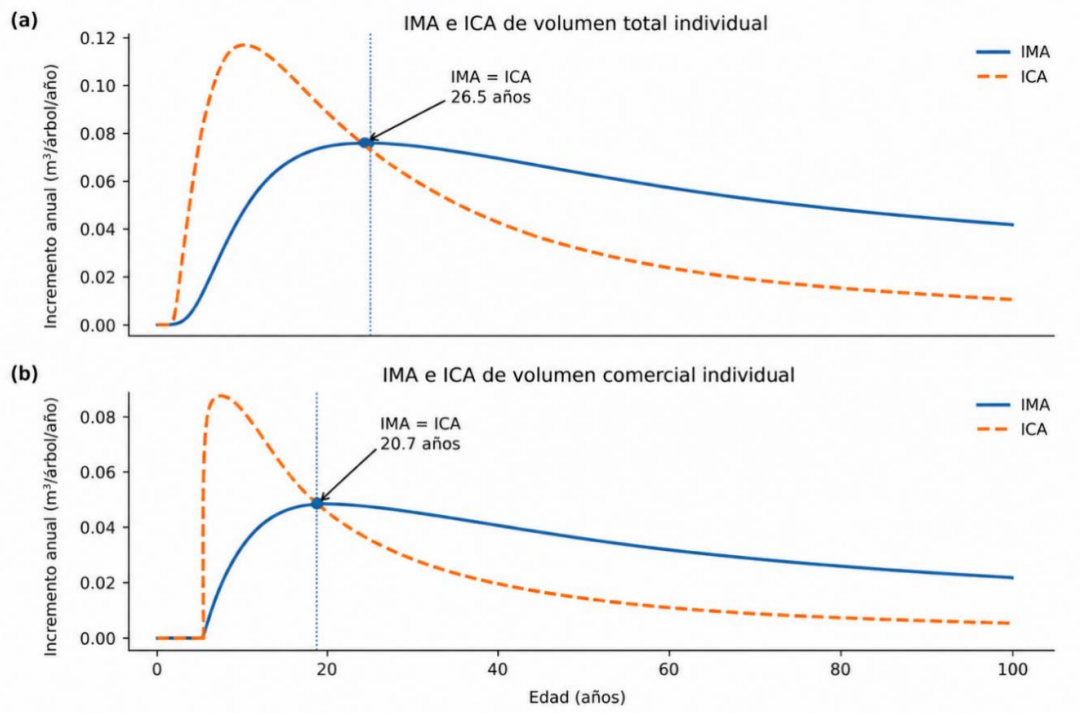


Nota. La línea continua representa el Incremento Medio Anual (IMA) y la línea discontinua el Incremento Corriente Anual (ICA). La línea vertical punteada indica la edad de culminación del IMA, correspondiente a la intersección entre ambas curvas. Las curvas fueron derivadas de los modelos de crecimiento ajustados para *J. neotropica* utilizando la Base Nacional Epidométrica del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

El modelo ajustado para el área de copa presentó una culminación estimada del IMA alrededor de los 8,4 años. Sin embargo, la relación edad–área de copa mostró elevada dispersión (R^2 ajustado = 0,20), por lo que esta edad debe interpretarse como una referencia derivada de la tendencia media del modelo y no como un umbral general de desarrollo de la copa para *J. neotropica*. Las decisiones sobre podas, liberaciones o regulación de densidad deben sustentarse principalmente en la evaluación directa de la arquitectura y competencia de copas de cada rodal. Para las variables directamente relacionadas con la producción maderable, la Figura 13.6 presenta las curvas de IMA e ICA del volumen comercial y del volumen total individual.

Figura 13.6

Curvas del Incremento Medio Anual (IMA) y del Incremento Corriente Anual (ICA) para volumen comercial y volumen total individual



Nota. La línea continua representa el Incremento Medio Anual (IMA) y la línea discontinua el Incremento Corriente Anual (ICA). La línea vertical punteada indica la edad de culminación del IMA, correspondiente a la intersección entre ambas curvas. Las curvas fueron derivadas de los modelos de crecimiento ajustados para *J. neotropica* utilizando la Base Nacional Epidométrica del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Las variables volumétricas presentaron una culminación del IMA a edades posteriores (**20,7 años** para el volumen comercial individual y **26,5 años** para el volumen total individual), lo que indica que la producción de madera continúa incrementándose aun cuando el crecimiento en diámetro y otras variables estructurales comienza a desacelerarse. Este comportamiento confirma que la acumulación de volumen responde a un proceso integrador del crecimiento en diámetro y altura, por lo que constituye un criterio de especial importancia para definir turnos de aprovechamiento y estrategias de manejo orientadas a la producción maderable.

En conjunto, las curvas de IMA e ICA muestran que las diferentes variables dasométricas alcanzan su culminación en momentos distintos del desarrollo de *J. neotropica*, reflejando cambios sucesivos en la asignación de recursos hacia el crecimiento longitudinal, diamétrico, expansión de copa y acumulación de volumen. Esta secuencia proporciona una base objetiva para programar intervenciones silviculturales de acuerdo con el objetivo de manejo, ya sea favorecer el crecimiento individual, optimizar la producción de madera o mantener la estabilidad estructural del rodal.

13.1.5 Integración de la epidometría al manejo silvicultural de *J. neotropica*

La modelación epidométrica desarrollada para *J. neotropica* permitió transformar las curvas de crecimiento en herramientas objetivas para apoyar la planificación del manejo silvicultural. La integración de los modelos de altura dominante, diámetro normal, área basal, área de copa y volumen con los indicadores de Incremento Medio Anual (IMA) e Incremento Corriente Anual (ICA) proporciona una base cuantitativa para interpretar la dinámica de crecimiento de la especie y orientar la programación de las principales intervenciones silviculturales.

El análisis conjunto de las curvas de IMA e ICA evidencia que las diferentes variables dasométricas alcanzan su culminación en momentos distintos del desarrollo de la especie, reflejando una secuencia funcional de asignación de recursos. Durante las primeras etapas predomina la expansión de la copa y el establecimiento de la capacidad fotosintética; posteriormente se intensifica el crecimiento diamétrico y la acumulación de biomasa leñosa, mientras que la producción volumétrica alcanza su máxima eficiencia media en edades más avanzadas. Esta progresión constituye una referencia objetiva para comprender la ontogenia del crecimiento de *J. neotropica* y orientar técnicamente el manejo forestal.

La Tabla 13.6 resume las edades de culminación del Incremento Medio Anual obtenidas para las principales variables dasométricas y su interpretación desde la perspectiva del manejo silvicultural.

Tabla 13.6

Edad de culminación del Incremento Medio Anual (IMA) e interpretación silvicultural para las principales variables dasométricas de Juglans neotropica

Variable	Edad IMA = ICA (años)	Interpretación silvicultural
Área de copa	**8,4**	Indica la culminación del crecimiento promedio de la copa y el inicio de una mayor competencia por el espacio aéreo. Constituye una referencia para evaluar podas de formación, liberaciones y ajustes de densidad durante las primeras etapas del desarrollo del rodal.
Diámetro normal (DAP)	**10,4**	Señala la culminación del crecimiento diamétrico promedio, proporcionando un criterio técnico para programar raleos orientados a favorecer el incremento individual de los árboles remanentes.
Altura dominante	**17,0**	Marca la culminación del crecimiento longitudinal promedio y permite evaluar la respuesta del rodal a la calidad del sitio y al grado de competencia vertical entre individuos.
Área basal individual	**20,9**	Refleja la consolidación estructural del crecimiento del fuste y la ocupación del espacio por el rodal, siendo un indicador útil para definir la intensidad de futuras intervenciones silviculturales.
Volumen total individual	**26,5**	Corresponde a la culminación del crecimiento medio de la producción total de madera y constituye una referencia técnica para el análisis del turno biológico cuando el objetivo principal es maximizar el volumen acumulado.

Nota. Las edades corresponden a la intersección entre el Incremento Medio Anual (IMA) y el Incremento Corriente Anual (ICA), calculadas a partir de las funciones de crecimiento ajustadas para *J. neotropica* utilizando la Base Nacional Epidométrica del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Es importante señalar que la culminación del Incremento Medio Anual no debe interpretarse como el momento exacto para ejecutar una intervención silvicultural. La intersección entre las curvas del IMA y del ICA representa la culminación de la eficiencia media del crecimiento de una variable determinada y constituye un indicador técnico de referencia, mas no un umbral rígido de manejo. En el caso de los raleos, por ejemplo, las intervenciones generalmente deben programarse antes de la culminación del IMA, cuando la competencia entre copas comienza a limitar el crecimiento de los árboles seleccionados. De manera similar, la culminación del IMA del volumen representa un criterio objetivo para evaluar el turno biológico del rodal, cuya aplicación deberá complementarse con consideraciones económicas, ecológicas y de manejo.

La información epidométrica también permite establecer una secuencia lógica de intervenciones silviculturales a lo largo del ciclo de desarrollo de la especie. Durante los primeros años, las labores deben orientarse a garantizar el establecimiento de la plantación mediante el control de malezas, la reposición de plantas, la protección contra daños y la formación de un fuste recto mediante podas tempranas. Conforme aumenta la competencia por luz y espacio, la información derivada de las curvas de crecimiento facilita identificar el periodo más apropiado para evaluar la aplicación de raleos selectivos destinados a favorecer los individuos de mejor calidad.

Posteriormente, cuando el crecimiento diamétrico y la acumulación de área basal alcanzan sus mayores tasas medias, las intervenciones deben concentrarse en liberar los árboles de futura cosecha y mantener elevadas tasas de crecimiento individual. Finalmente, durante la fase de máxima producción volumétrica, la culminación del IMA constituye un criterio técnico para analizar el turno biológico y planificar el aprovechamiento de acuerdo con los objetivos de producción, restauración o conservación del rodal.

La Tabla 13.7 integra las principales orientaciones silviculturales derivadas del análisis epidométrico, relacionando las etapas del desarrollo con la evidencia cuantitativa obtenida y las intervenciones recomendadas para cada fase del crecimiento.

Tabla 13.7

Orientaciones silviculturales referenciales derivadas del análisis epidométrico de Juglans neotropica

Etapa del desarrollo	Edad aproximada (años)	Evidencia epidométrica	Objetivo del manejo	Intervenciones a evaluar
Establecimiento	0–4	Crecimiento inicial del sistema radical y establecimiento del eje principal.	Favorecer el prendimiento y la supervivencia.	Control de malezas, reposición de plantas, fertilización de apoyo y protección contra herbivoría.
Formación de copa	5–8	Máxima expansión de la copa y aproximación al cierre del dosel.	Formar árboles rectos y de buena calidad.	Poda de formación, eliminación de bifurcaciones y ramas competidoras, seguimiento sanitario.

Tabla 13.7 (continuación)

Orientaciones silviculturales referenciales derivadas del análisis epidométrico de Juglans neotropica

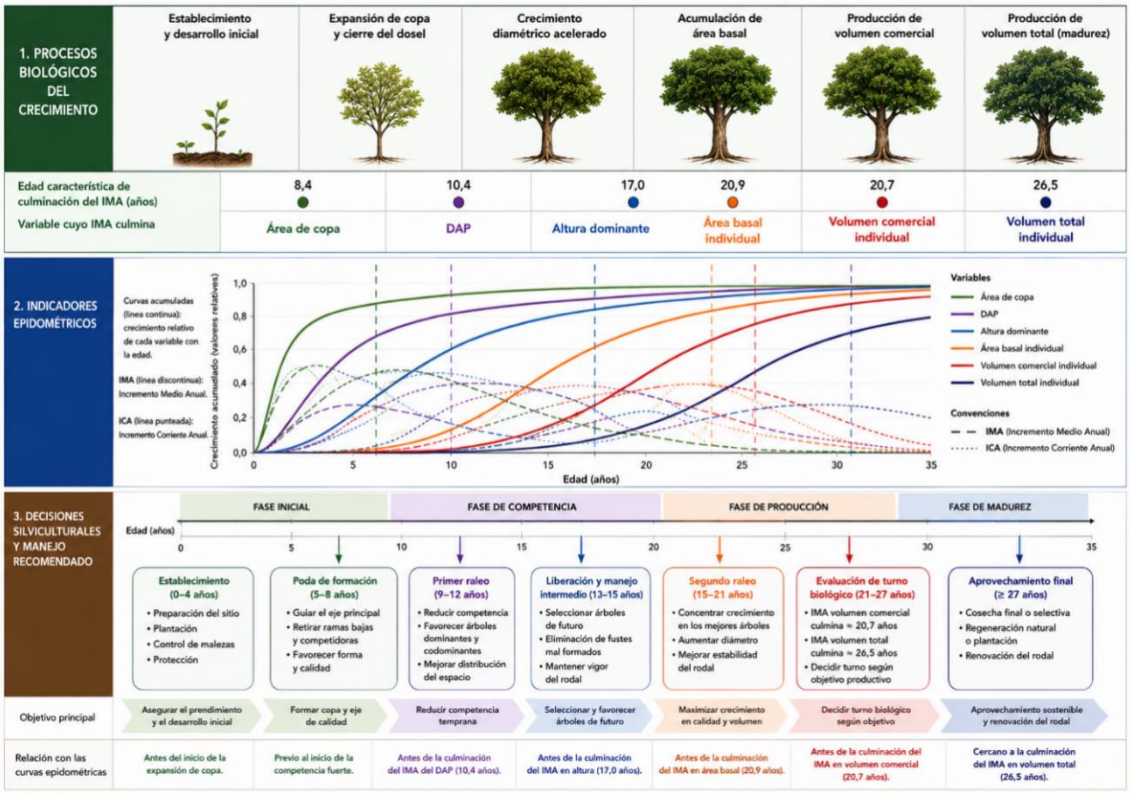
Etapa del desarrollo	Edad aproximada (años)	Evidencia epidométrica	Objetivo del manejo	Intervenciones a evaluar
Crecimiento diamétrico acelerado	9–12	Incremento rápido del DAP y aumento de la competencia.	Reducir la competencia temprana.	Evaluar el cierre de copas y realizar el primer raleo cuando exista competencia significativa.
Acumulación de área basal	13–20	Mayor acumulación de biomasa leñosa.	Concentrar el crecimiento en árboles de futura cosecha.	Segundo raleo selectivo, liberación de árboles dominantes y control de individuos defectuosos.
Producción volumétrica	21–27	Culminación del IMA del volumen comercial y total.	Optimizar la producción de madera.	Evaluación del turno biológico, definición del momento de aprovechamiento o prolongación del turno según el objetivo productivo.
Madurez del rodal	>27	Disminución progresiva de la eficiencia del crecimiento.	Mantener la productividad y la estabilidad del rodal.	Evaluar continuidad del turno, aprovechamientos selectivos o renovación del sistema según objetivos, dimensiones, calidad del fuste, sanidad y restricciones legales y ecológicas.

Nota. Las edades indicadas son referenciales y representan etapas aproximadas del desarrollo de *J. neotropica* derivadas del análisis epidométrico. Las intervenciones propuestas constituyen orientaciones silviculturales y no umbrales rígidos de manejo; su aplicación debe ajustarse a las condiciones del sitio, la densidad y competencia del rodal, el estado sanitario, la calidad de los árboles y los objetivos de manejo.

Con el propósito de sintetizar la relación entre la dinámica del crecimiento y la secuencia de decisiones silviculturales, la Figura 13.7 integra los principales procesos biológicos del desarrollo de *J. neotropica*, la evolución de los indicadores epidométricos y las intervenciones de manejo recomendadas a lo largo del ciclo del rodal.

Figura 13.7

Integración gráfica de la dinámica de crecimiento y las intervenciones de manejo de Juglans neotropica



Nota. La figura integra la dinámica del crecimiento, los principales indicadores epidométricos y las intervenciones silviculturales asociadas con las diferentes etapas de desarrollo de *J. neotropica*. Las edades e intervenciones representadas son referenciales y deben ajustarse a las condiciones del sitio, la competencia del rodal y los objetivos de manejo.

La epidometría constituye una herramienta de apoyo para la toma de decisiones y no un sustituto de la evaluación silvicultural de campo. Las edades derivadas de la culminación del Incremento Medio Anual representan referencias técnicas que deben interpretarse conjuntamente con la calidad del sitio, la densidad inicial de plantación, el material genético, el estado sanitario, la intensidad de competencia y los objetivos específicos de manejo. En consecuencia, la integración del análisis epidométrico con la evaluación silvicultural permite desarrollar estrategias de manejo adaptativo orientadas a maximizar simultáneamente la productividad, la calidad de la madera, la estabilidad estructural del rodal y la conservación de los ecosistemas forestales.

13.2 Estrategias silviculturales para diferentes objetivos y contextos de manejo

El manejo silvicultural de *J. neotropica* comprende el conjunto de sistemas, tratamientos y técnicas orientados a regular el establecimiento, crecimiento, desarrollo y aprovechamiento de la especie en función de objetivos específicos de producción, conservación y restauración. A diferencia de otras especies forestales manejadas bajo un

único propósito productivo, el nogal andino puede integrarse en una amplia diversidad de sistemas de uso del suelo, incluyendo plantaciones forestales, sistemas agroforestales, arbolado urbano y bosques nativos, donde las prioridades de manejo difieren de acuerdo con los bienes y servicios que se pretende obtener.

Los capítulos precedentes demostraron que el crecimiento de *J. neotropica* responde a una secuencia biológica claramente definida, caracterizada por cambios progresivos en la asignación de recursos hacia la expansión de la copa, el crecimiento diamétrico, la acumulación de biomasa y la producción de volumen. Asimismo, la modelación epidométrica permitió identificar las edades de culminación del Incremento Medio Anual (IMA) para las principales variables dasométricas, proporcionando indicadores objetivos para interpretar la dinámica de crecimiento y orientar la planificación de las intervenciones silviculturales. Estos resultados constituyen la base científica sobre la cual deben programarse prácticas como la poda, los raleos, la liberación de árboles de futura cosecha y la definición del turno biológico.

Sin embargo, la aplicación de estos tratamientos no es uniforme para todos los sistemas de manejo. Mientras las plantaciones orientadas a la producción de madera de calidad priorizan la obtención de fustes rectos, libres de nudos y con elevados incrementos diamétricos, los sistemas multipropósito buscan compatibilizar la producción de madera con frutos, productos forestales no madereros y servicios ecosistémicos. De igual manera, el manejo de *J. neotropica* en sistemas agroforestales, arbolado urbano y bosques nativos responde a objetivos particulares relacionados con la regulación del dosel, la conservación de la biodiversidad, la restauración ecológica y la provisión de beneficios ambientales y sociales.

En este contexto, las estrategias de manejo silvicultural presentadas en este capítulo se estructuran en torno a tres grandes ejes complementarios: la producción de madera de calidad, la producción multipropósito de bienes y servicios ecosistémicos y el manejo según el contexto del paisaje, integrando la información biológica, epidométrica y ecológica generada durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) con la literatura científica disponible. Este enfoque permite vincular el conocimiento sobre el crecimiento de *J. neotropica* con criterios técnicos para la toma de decisiones silviculturales, favoreciendo un manejo adaptativo orientado a maximizar simultáneamente la productividad, la provisión de bienes y servicios ecosistémicos, la conservación y la sostenibilidad de los paisajes andinos. La Figura 13.8 presenta el marco conceptual que integra estos tres ejes de manejo con las bases científicas que sustentan la toma de decisiones silviculturales y los resultados esperados para el manejo sostenible de la especie.

Figura 13.8

Marco conceptual y estratégico para el manejo silvicultural de Juglans neotropica

Nota. El marco integra los objetivos de manejo, las bases científicas para la toma de decisiones silviculturales y los resultados esperados. Su aplicación requiere un enfoque adaptativo que permita ajustar las intervenciones conforme evolucionan el rodal, las condiciones del sitio y los objetivos de manejo. Fuente: Elaboración a partir del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) y de la literatura científica citada en este capítulo.

13.2.1 Producción de madera de calidad

La producción de madera de calidad constituye uno de los principales objetivos del manejo silvicultural de *J. neotropica*, debido al elevado valor tecnológico y comercial de su madera para ebanistería, carpintería fina, chapas decorativas y otros productos de alto valor agregado. Alcanzar este objetivo requiere orientar el crecimiento del árbol hacia la formación de fustes rectos, cilíndricos, libres de bifurcaciones y con una reducida presencia de nudos, condiciones que determinan la calidad estructural y estética de la madera obtenida al momento del aprovechamiento.

A diferencia de especies manejadas exclusivamente para maximizar la producción de volumen, el manejo silvicultural del nogal andino debe equilibrar el crecimiento en diámetro con la calidad del fuste. En consecuencia, las decisiones relacionadas con podas, raleos y conducción del rodal deben sustentarse en el conocimiento de la dinámica de crecimiento de la especie y no únicamente en criterios cronológicos o en calendarios fijos de intervención.

Los resultados presentados en los apartados anteriores muestran que el crecimiento de *J. neotropica* ocurre mediante una secuencia ordenada de procesos biológicos. Durante las primeras etapas predomina la expansión de la copa y el establecimiento del eje principal; posteriormente se intensifica el crecimiento diamétrico y la acumulación de área basal, mientras que la producción de volumen adquiere mayor importancia en edades más avanzadas. Esta secuencia, complementada con las curvas de Incremento Medio Anual (IMA) e Incremento Corriente Anual (ICA), proporciona criterios objetivos para sincronizar las intervenciones silviculturales con las diferentes fases del desarrollo del rodal.

En este contexto, las podas de formación deben concentrarse durante los primeros años de crecimiento, cuando la arquitectura del árbol aún puede corregirse con heridas de pequeño diámetro y rápida cicatrización. Su objetivo principal es mantener un único eje dominante, eliminar bifurcaciones y favorecer la formación de un fuste recto que constituya la futura troza de mayor valor comercial. Conforme aumenta la competencia entre árboles y se acelera el crecimiento diamétrico, las podas de calidad permiten eliminar gradualmente las ramas inferiores antes de que alcancen diámetros que comprometan la calidad de la madera mediante la formación de nudos de gran tamaño.

Los raleos constituyen el segundo componente fundamental del manejo orientado a la producción de madera. Su finalidad no es incrementar la producción total del rodal, sino redistribuir el crecimiento hacia los individuos de mejor conformación, concentrando el incremento diamétrico en los árboles seleccionados para la cosecha futura. Como se discutió en el apartado de epidometría, la culminación del Incremento Medio Anual no debe interpretarse como el momento exacto para ejecutar un raleo, sino como un indicador de referencia para evaluar el aumento de la competencia y programar las intervenciones antes de que esta reduzca significativamente el crecimiento de los árboles de interés.

La intensidad y frecuencia de las podas y raleos dependerán de factores como la calidad del sitio, la densidad inicial de plantación, el material genético utilizado, la arquitectura individual de los árboles y los objetivos específicos del manejo. En consecuencia, estas prácticas deben desarrollarse bajo un enfoque de manejo adaptativo, ajustando las intervenciones de acuerdo con el monitoreo continuo del crecimiento del rodal y la respuesta observada después de cada tratamiento silvicultural.

La producción de madera de alta calidad en *J. neotropica* depende de la aplicación oportuna y coordinada de los tratamientos silviculturales a lo largo del desarrollo del rodal. La integración del crecimiento, la información epidométrica y el monitoreo continuo permite programar las intervenciones en función de la evolución del árbol y no únicamente de su edad cronológica. La Figura 13.9 sintetiza la secuencia general de manejo orientada a la formación de árboles de alta calidad para la producción de madera, destacando el papel de las podas, los raleos selectivos y la evaluación periódica del rodal como elementos fundamentales del manejo adaptativo.

Figura 13.9

Secuencia del manejo silvicultural para la producción de madera de calidad en Juglans neotropica

Nota. La figura integra la secuencia general de tratamientos silviculturales orientados a la producción de madera de alta calidad en *J. neotropica*. La programación de las podas, los raleos selectivos y las demás intervenciones debe sustentarse en el monitoreo del crecimiento del rodal, la información epidométrica, la calidad del sitio y los objetivos específicos del manejo. La fotografía ilustra las consecuencias de una poda tardía, caracterizada por la persistencia de ramas de gran diámetro que originan nudos de mayor tamaño y disminuyen la calidad potencial de la madera.

13.2.2 Producción multipropósito de bienes y servicios ecosistémicos

La producción multipropósito constituye uno de los enfoques más prometedores para el manejo sostenible de *J. neotropica*, al permitir integrar la producción de madera con la obtención de productos forestales no madereros (PFNM) y la provisión de servicios ecosistémicos dentro de un mismo sistema de manejo. A diferencia de los esquemas silviculturales tradicionales orientados exclusivamente a maximizar el volumen de madera, este enfoque reconoce que un mismo árbol puede generar múltiples beneficios económicos, ecológicos y sociales a lo largo de su ciclo de vida, incrementando la resiliencia y sostenibilidad de los paisajes forestales andinos.

En *J. neotropica*, el principal producto forestal no maderero corresponde a los frutos (nueces), cuyo aprovechamiento puede coexistir con la producción futura de madera siempre que la arquitectura del árbol y las intervenciones silviculturales se planifiquen desde las etapas iniciales del establecimiento. Paralelamente, el

mantenimiento de una copa funcional favorece la captura y almacenamiento de carbono, la regulación microclimática, la conservación del suelo, el hábitat para la biodiversidad y otros servicios ecosistémicos desarrollados en el capítulo 11. En consecuencia, el manejo multipropósito busca optimizar simultáneamente la producción de bienes y la provisión de servicios, evitando que el incremento de uno de ellos comprometa los demás.

La principal diferencia respecto al manejo orientado exclusivamente a la producción de madera radica en la arquitectura final del árbol. Mientras las plantaciones maderables priorizan la obtención de fustes largos, rectos y con copas relativamente reducidas, los sistemas multipropósito requieren conservar una copa equilibrada que permita mantener una elevada superficie fotosintética y favorecer la floración y fructificación sin afectar significativamente la calidad del fuste. Este equilibrio exige adaptar la intensidad de las podas, la frecuencia de los raleos y la distribución espacial de los árboles de acuerdo con los objetivos productivos del sistema.

En este contexto, se plantea como propuesta conceptual un sistema de líder central modificado para el manejo multipropósito de *J. neotropica*. El sistema busca conservar un eje principal dominante que favorezca la formación de una sección de fuste potencialmente aprovechable, al tiempo que mantiene una copa superior funcional mediante la conservación selectiva de ramas estructurales. Como marco inicial para su evaluación, la propuesta se estructura en tres principios: conservación de un eje principal, poda selectiva de ramas que comprometan la conformación del fuste y mantenimiento de una copa superior funcional. La respuesta de la especie a este sistema deberá evaluarse experimentalmente antes de establecer edades, intensidades de poda, proporciones de copa o efectos sobre la producción de frutos y la calidad de la madera.

Desde el punto de vista operativo, el sistema de líder central modificado comprende tres principios fundamentales: (i) mantener un eje principal único durante las primeras etapas de desarrollo; (ii) realizar podas tempranas de formación y calidad únicamente sobre las ramas que comprometan la rectitud del fuste o generen defectos futuros en la madera; y (iii) conservar una copa superior amplia, equilibrada y bien distribuida que favorezca simultáneamente la producción de frutos, la estabilidad mecánica del árbol y la provisión de servicios ecosistémicos. La intensidad de las intervenciones deberá ajustarse mediante un enfoque de manejo adaptativo, considerando el crecimiento del árbol, la respuesta de la copa y los objetivos específicos de cada sistema productivo.

La aplicación de este modelo resulta particularmente apropiada para sistemas agroforestales, plantaciones familiares, programas de restauración productiva y otros paisajes donde la diversificación de bienes y servicios constituye un objetivo prioritario. En estos contextos, la integración de madera, productos forestales no madereros y servicios ecosistémicos incrementa la estabilidad económica del sistema, reduce los riesgos asociados a la dependencia de un único producto y fortalece la bioeconomía basada en especies nativas.

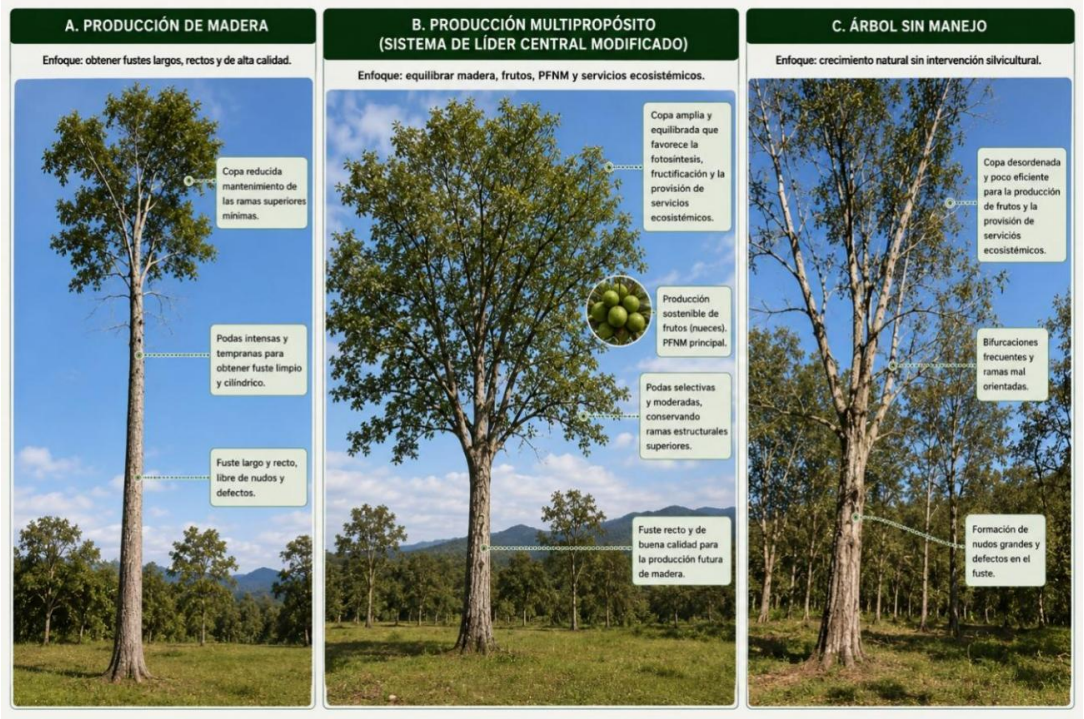
En conjunto, el manejo multipropósito representa una evolución conceptual del manejo silvicultural tradicional al considerar a *J. neotropica* como una especie multifuncional capaz de contribuir simultáneamente a la producción forestal, la restauración ecológica y el desarrollo sostenible de los paisajes andinos. Bajo este

enfoque, las intervenciones silviculturales dejan de orientarse exclusivamente a maximizar el volumen de madera y pasan a optimizar el conjunto de bienes y servicios que la especie puede proporcionar durante todo su ciclo de vida.

El manejo silvicultural de *J. neotropica* puede orientarse hacia diferentes objetivos productivos mediante la modificación de la arquitectura del árbol y la intensidad de las intervenciones. La comparación entre un sistema orientado exclusivamente a la producción de madera, un sistema multipropósito y un árbol sin manejo permite visualizar las diferencias estructurales que determinan la obtención de bienes y la provisión de servicios ecosistémicos. La Figura 13.10 sintetiza estos tres modelos de conducción y sus principales implicaciones para el manejo sostenible de la especie.

Figura 13.10

Modelos de conducción silvicultural de Juglans neotropica según el objetivo de manejo



Nota. La figura compara tres estrategias de conducción silvicultural de *J. neotropica*: **(A)** producción de madera de calidad, caracterizada por la formación de fustes rectos mediante podas y manejo de la competencia; **(B)** producción multipropósito mediante un sistema de líder central modificado, que busca compatibilizar la producción de madera, productos forestales no madereros (PFNM), especialmente frutos, y la provisión de servicios ecosistémicos; y **(C)** árboles sin manejo silvicultural, donde la ausencia de conducción favorece bifurcaciones, copas desordenadas y una menor eficiencia para cumplir objetivos productivos específicos. El sistema de líder central modificado constituye una propuesta conceptual para el manejo multipropósito de *J. neotropica*, desarrollada a partir de la integración de los resultados del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), la arquitectura de la especie y los principios de la silvicultura moderna.

13.2.3 Manejo según el contexto del paisaje

Las estrategias silviculturales descritas en los apartados anteriores constituyen principios generales para el manejo de *J. neotropica*. Sin embargo, su aplicación debe ajustarse al contexto ecológico, productivo y social donde se desarrolla la especie, debido a que las condiciones de competencia, la estructura del rodal, los objetivos del manejo y los bienes y servicios esperados difieren entre paisajes. En consecuencia, el manejo silvicultural debe entenderse como un proceso adaptativo que integra el conocimiento biológico, el crecimiento, la epidometría y las características específicas de cada sistema de producción o conservación.

Bosques nativos

En los bosques nativos, el objetivo principal es conservar la estructura, composición y funcionalidad del ecosistema, manteniendo simultáneamente la capacidad productiva y la regeneración natural de *J. neotropica*. En este contexto, las intervenciones deben ser de baja intensidad y orientarse preferentemente a tratamientos de liberación, eliminación de individuos severamente afectados por daños o enfermedades, favorecimiento de la regeneración natural y, cuando corresponda, aprovechamientos selectivos de bajo impacto. La información sobre crecimiento y epidometría constituye una herramienta de apoyo para evaluar la dinámica del rodal, sin reemplazar la necesidad de conservar la diversidad estructural y ecológica propia del bosque andino.

Plantaciones forestales

Las plantaciones forestales permiten aplicar de forma más controlada los principios desarrollados en los apartados anteriores. Cuando el objetivo principal es la producción de madera de calidad, las podas de formación, las podas de calidad y los raleos selectivos deben programarse de acuerdo con la evolución del crecimiento y el incremento de la competencia entre árboles, utilizando la información epidométrica como criterio de apoyo para la toma de decisiones. Este tipo de manejo favorece la obtención de fustes rectos, cilíndricos y de elevado valor comercial, optimizando simultáneamente la productividad del rodal.

Sistemas agroforestales

En los sistemas agroforestales, el manejo silvicultural debe armonizar la producción forestal con los requerimientos de los cultivos y, en algunos casos, de los componentes pecuarios. La regulación de la densidad del dosel, la arquitectura de la copa y la disponibilidad de luz constituyen aspectos fundamentales para mantener la productividad del sistema en su conjunto. En estos contextos, el sistema de líder central modificado representa una alternativa adecuada para compatibilizar la producción de madera de calidad con la obtención de productos forestales no madereros, especialmente frutos, y la conservación de los servicios ecosistémicos analizados en el capítulo 11.

Arbolado urbano

El manejo del arbolado urbano responde a objetivos diferentes de los sistemas forestales productivos. Además de preservar el vigor y la estabilidad mecánica del árbol,

las intervenciones deben orientarse a garantizar la seguridad de las personas y la infraestructura, mantener la calidad paisajística y potenciar la provisión de servicios ecosistémicos, como la regulación microclimática, el almacenamiento de carbono y el bienestar asociado a los espacios verdes urbanos. En consecuencia, las podas deben realizarse con criterios arborícolas, evitando intervenciones severas que comprometan la arquitectura natural, la estabilidad estructural o la longevidad del árbol.

En todos los contextos descritos, las decisiones silviculturales deben sustentarse en un proceso continuo de monitoreo y evaluación, ajustando la intensidad y oportunidad de las intervenciones conforme evolucionan el crecimiento del rodal, las condiciones del sitio y los objetivos del manejo. Bajo este enfoque, los principios desarrollados para *J. neotropica* no constituyen un conjunto rígido de tratamientos, sino una base técnica que puede adaptarse a diferentes paisajes para optimizar simultáneamente la producción de bienes, la provisión de servicios ecosistémicos y la conservación de los bosques andinos.

Aunque los principios silviculturales descritos en los apartados anteriores constituyen la base para el manejo de *J. neotropica*, su aplicación debe ajustarse a las características ecológicas, productivas y sociales de cada paisaje. La intensidad de las intervenciones, los objetivos del manejo y los bienes y servicios esperados difieren entre bosques nativos, plantaciones forestales, sistemas agroforestales y arbolado urbano, por lo que las decisiones silviculturales requieren un enfoque adaptativo sustentado en información científica. La Figura 13.11 resume la aplicación de estos principios en los principales contextos donde se desarrolla la especie en Ecuador.

Figura 13.11

Aplicación de las estrategias de manejo silvicultural de Juglans neotropica en diferentes contextos del paisaje

Nota. La figura sintetiza la adaptación de las estrategias de manejo silvicultural de *J. neotropica* a cuatro contextos del paisaje: **(A)** bosques nativos, donde predominan la conservación de la estructura del bosque, la regeneración natural y los aprovechamientos selectivos de bajo impacto; **(B)** plantaciones forestales, orientadas principalmente a la producción de madera de calidad mediante podas, raleos y monitoreo del crecimiento; **(C)** sistemas agroforestales, donde el manejo busca integrar la producción de madera, productos forestales no madereros (PFNM), especialmente frutos, y la provisión de servicios ecosistémicos mediante un sistema de líder central modificado; y **(D)** arbolado urbano, cuyo manejo prioriza la seguridad, la arboricultura, la calidad paisajística y los servicios ecosistémicos. En todos los casos, las decisiones silviculturales se fundamentan en bases científicas comunes que integran el conocimiento sobre la biología y ecología de la especie, el crecimiento, la epidometría, la calidad del sitio, el estado sanitario, el monitoreo continuo y el manejo adaptativo.

13.3 Manejo sanitario adaptativo

La sostenibilidad de las plantaciones, sistemas agroforestales, bosques nativos y árboles urbanos de *J. neotropica* depende no solo de la adecuada aplicación de tratamientos silviculturales, sino también de la conservación de su condición fitosanitaria a lo largo de todo el ciclo de desarrollo. Las plagas, enfermedades, especies invasoras y otros organismos asociados pueden modificar el crecimiento, afectar la calidad del fuste, reducir la producción de frutos y comprometer la estabilidad estructural de los árboles

cuando no se detectan y manejan oportunamente. En consecuencia, el manejo sanitario constituye un componente esencial del manejo forestal sostenible y debe integrarse con la información biológica, epidométrica y silvicultural presentada en los apartados precedentes.

El enfoque moderno del manejo sanitario ha evolucionado desde estrategias basadas exclusivamente en el control de organismos perjudiciales hacia modelos preventivos fundamentados en el monitoreo continuo, el diagnóstico oportuno y la toma de decisiones adaptativas. Bajo esta perspectiva, la sanidad del rodal no depende únicamente de la aplicación de medidas de control, sino también de factores como la calidad del sitio, la densidad de plantación, la arquitectura del árbol, las prácticas de poda y raleo, la diversidad biológica y el estado fisiológico de los individuos. En consecuencia, las intervenciones sanitarias deben considerarse parte del manejo silvicultural y no actividades independientes ejecutadas únicamente cuando aparecen síntomas visibles.

Los estudios realizados en Ecuador durante las últimas décadas evidencian que *J. neotropica* interactúa con una amplia diversidad de insectos, hongos, plantas invasoras y organismos epífitos cuya incidencia varía según el ecosistema, el sistema de producción y las condiciones ambientales. Mientras algunos organismos ocasionan pérdidas económicas o reducen la calidad de la madera, otros forman parte de la biodiversidad asociada y cumplen funciones ecológicas importantes, por lo que requieren estrategias de manejo diferenciadas. Esta evidencia confirma que el manejo sanitario debe orientarse hacia un enfoque de **Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIPE)**, complementado con prácticas silviculturales preventivas y un seguimiento permanente del estado fitosanitario del rodal.

Bajo este enfoque, las decisiones sanitarias deben sustentarse en un ciclo continuo de observación, diagnóstico, intervención y evaluación, ajustando las medidas de manejo conforme evolucionan el crecimiento del rodal, las condiciones ambientales y la respuesta de los árboles. Este principio de manejo adaptativo permite reducir el uso innecesario de insumos químicos, favorecer el control biológico, conservar la biodiversidad asociada y mantener la productividad de *J. neotropica* en los diferentes contextos del paisaje donde se desarrolla la especie.

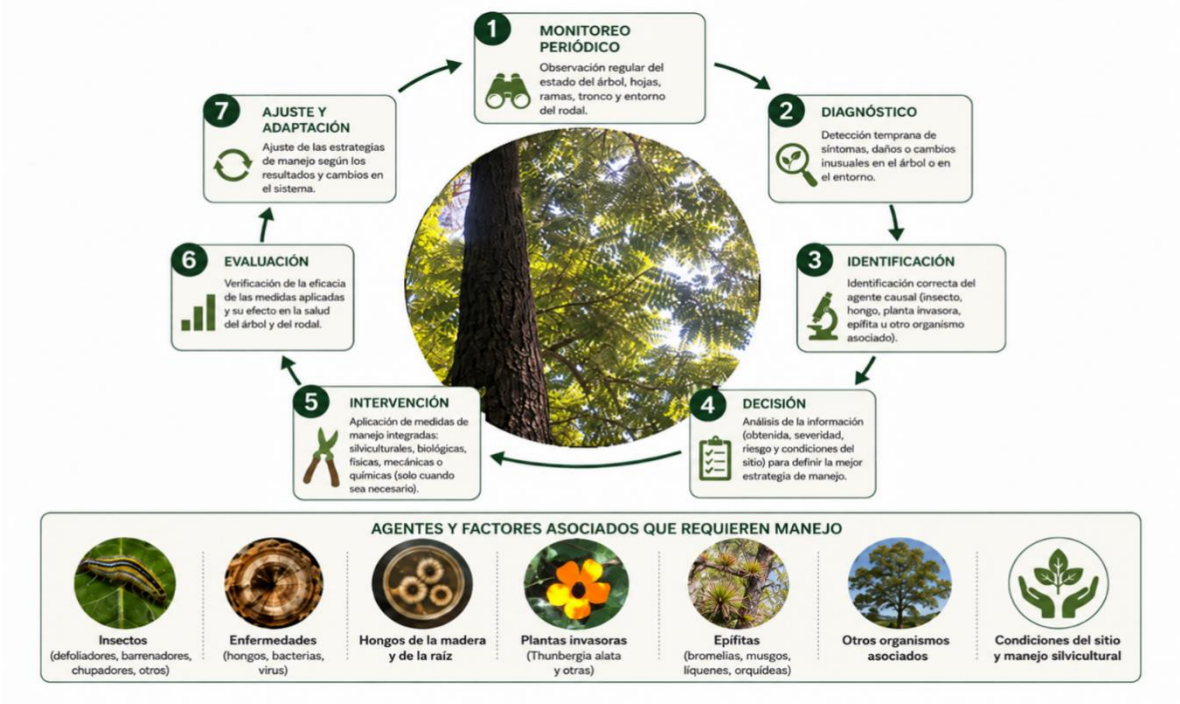
La estructura del presente apartado se organiza en tres componentes complementarios: (i) el manejo integrado de plagas y enfermedades, (ii) el manejo de especies invasoras asociadas a las plantaciones y (iii) el manejo de epífitas presentes en árboles adultos. En conjunto, estos componentes constituyen una estrategia integral orientada a mantener la salud del rodal, proteger la calidad de la madera, conservar los productos forestales no madereros y asegurar la provisión de los servicios ecosistémicos asociados al nogal andino.

El manejo sanitario de *J. neotropica* debe concebirse como un proceso continuo de observación, evaluación y toma de decisiones, más que como una respuesta puntual frente a la aparición de plagas o enfermedades. La integración del monitoreo sistemático con el diagnóstico oportuno y la selección de medidas de manejo permite mantener la salud del rodal y reducir los riesgos asociados a factores bióticos y abióticos. La Figura 13.12 sintetiza el ciclo del manejo sanitario adaptativo propuesto para la especie,

integrando las principales etapas del proceso y los agentes que requieren seguimiento durante el desarrollo del árbol.

Figura 13.12

Ciclo del manejo sanitario adaptativo de Juglans neotropica



Nota. El esquema presenta un ciclo de manejo sanitario adaptativo para *J. neotropica*: los resultados del monitoreo y la evaluación orientan las decisiones y los ajustes posteriores. La fotografía central muestra un nogal adulto en Alausí, Chimborazo, Ecuador. Esquema: elaboración con base en información del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

13.3.1 Manejo integrado de plagas y enfermedades

El manejo de plagas y enfermedades en *J. neotropica* debe fundamentarse en los principios del Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIPE), priorizando la prevención, el monitoreo sistemático y la aplicación de medidas de control únicamente cuando la magnitud del daño comprometa la salud del árbol, la calidad de la madera o los objetivos del manejo del rodal. Este enfoque reconoce que la presencia de insectos y microorganismos forma parte de la dinámica natural de los ecosistemas forestales y que no todos los organismos asociados requieren intervenciones directas.

Los estudios desarrollados en Ecuador muestran que la incidencia y severidad de los problemas sanitarios varían de acuerdo con el sistema de producción, las condiciones ambientales y el estado fisiológico de los árboles.

Entre los insectos de mayor importancia sanitaria para *J. neotropica* se encuentra *Gretchena garai*, especie descrita por Miller (1987) a partir de ejemplares obtenidos de brotes recolectados cerca de Loja, Ecuador. Sus larvas atacan los brotes terminales y pueden provocar la pérdida de la dominancia apical y la formación de múltiples ejes líderes, afectando la conformación del fuste y, consecuentemente, la calidad potencial de la madera. Debido a los daños registrados en árboles jóvenes, esta especie ha sido objeto de investigaciones orientadas a conocer su biología, distribución y alternativas de manejo en Ecuador. La Figura 13.13 muestra un ejemplar adulto registrado en una plantación experimental de Yuyucocha (Imbabura), donde se desarrollaron investigaciones en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Figura 13.13

Adulto de Gretchena garai, principal insecto plaga asociado a Juglans neotropica en Ecuador

Nota. Adulto de *Gretchena garai* fotografiado en una plantación experimental de *J. neotropica* ubicada en el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte (Imbabura, Ecuador). Esta especie constituye uno de los principales insectos fitófagos asociados al nogal andino y ha sido objeto de diversos estudios sobre biología, incidencia y manejo integrado desarrollados en Ecuador, incluyendo investigaciones realizadas en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). Fuente: Añazco, M. Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Los antecedentes de la entomología forestal ecuatoriana muestran que la entomofauna asociada a *J. neotropica* es más diversa que la representada por *G. garai*. Gara y Onore (1989) registraron al nogal como hospedero de *Automeris* sp., *Lophocampa* sp., *Calloptilia callichora*, *Atto* sp., *Aetulion* sp., *Ceresa vitulus* y *Gretchena garai*. Estos registros constituyen un antecedente temprano sobre la diversidad de insectos asociados

a la especie en Ecuador; sin embargo, su presencia como organismos hospederos no implica necesariamente que todos alcancen la condición de plaga o produzcan daños de importancia económica.

En relación con *G. garai*, Ortega (2007) encontró que su incidencia en plantaciones de Imbabura fue considerablemente mayor en ambientes húmedos que en zonas secas y que la selección de especies acompañantes y las prácticas silviculturales, como las podas de formación, influyen en la susceptibilidad de las plantaciones al ataque de la plaga. En Zamora Chinchipe también se registraron daños sobre brotes terminales que afectaron el desarrollo fisiológico de los árboles (González & Ordoñez, 2009), mientras que Sarango (1987) ya había señalado su importancia económica en plantaciones de Loja.

En el marco del **Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026)**, los estudios realizados en el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte aportaron evidencia experimental sobre alternativas de manejo de *G. garai*. Navarrete & Ruiz (2024) evaluaron tratamientos biológicos, químicos, mecánicos y combinados en 384 individuos, demostrando que las estrategias integradas (control biológico complementado con insecticidas selectivos o control mecánico asociado a tratamientos químicos) lograron eliminar la infestación y, simultáneamente, favorecieron un mayor crecimiento en altura y área foliar. En esta misma línea de investigación y sobre la misma plataforma experimental de 384 individuos, Rosero Echeverría (2026) profundizó en el manejo silvicultural mediante evaluaciones comparativas mensuales, contrastando la eficacia de tratamientos estrictamente orgánicos frente a esquemas combinados (orgánico-químicos). Sus hallazgos corroboraron que la mitigación sistemática de la plaga exhibe una correlación directa y positiva con el rendimiento estructural del rodal, optimizando significativamente variables críticas de desarrollo como el diámetro basal, el área foliar y la tasa de crecimiento en altura. Estos resultados constituyen una de las primeras evidencias experimentales obtenidas para *J. neotropica* en Ecuador y respaldan la aplicación del MIPE como estrategia preferente frente al uso exclusivo de insecticidas.

En cuanto a enfermedades, las investigaciones realizadas en plantaciones experimentales también evidencian la presencia de hongos fitopatógenos asociados al debilitamiento de los árboles. Quizhpe (2024**)** identificó doce géneros de hongos en la Estación Experimental Tunshi (ESPOCH), incluyendo organismos benéficos como *Trichoderma* y *Metarhizium*, así como patógenos de importancia forestal pertenecientes a *Fusarium*, *Phytophthora* y Botryosphaeriaceae. Paralelamente, registró insectos barrenadores de las familias Curculionidae y Bostrichidae, cuya actividad incrementa la susceptibilidad a infecciones secundarias. Esta dinámica patológica también ha sido documentada en contextos de arbolado urbano andino; por ejemplo, Giraldo-Aristizábal et al. (2022) identificaron a ***Fusarium*** sp. y ***Alternaria*** sp. como los principales fitopatógenos asociados al deterioro sanitario de ***J. neotropica*** en Popayán (Colombia). A pesar de la alta incidencia de estos hongos y de insectos de los órdenes Collembola, Diptera y Coleoptera, dichos autores determinaron que los árboles mantienen una notable resiliencia urbana sin riesgo de muerte inminente. Estos resultados evidencian la necesidad de integrar el monitoreo sanitario con la conservación de enemigos naturales y las prácticas silviculturales preventivas.

En sistemas agroforestales del norte del Ecuador también se ha documentado la formación de cancros asociados al deterioro de los tejidos corticales y leñosos del tronco, cuya infección generalmente se inicia a través de heridas producidas por podas inadecuadas, daños mecánicos o fisuras en la corteza que facilitan el ingreso de hongos oportunistas.

Durante las evaluaciones de campo realizadas en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) se registraron árboles con lesiones compatibles con este tipo de afecciones en un sistema agroforestal de la parroquia El Carmelo, provincia del Carchi. La progresión de estas lesiones puede comprometer la estabilidad estructural del árbol, disminuir la calidad potencial de la madera y favorecer el ingreso de organismos secundarios, especialmente cuando concurren factores predisponentes como estrés hídrico o ataques de insectos barrenadores. La Figura 13.14 muestra uno de los casos documentados durante dichas evaluaciones de campo. Por ello, la prevención mediante podas técnicamente ejecutadas, la desinfección de herramientas, el monitoreo periódico y la eliminación oportuna del tejido afectado constituyen medidas fundamentales dentro del manejo sanitario adaptativo.

Figura 13.14

Cancro con exudación en el tronco de Juglans neotropica registrado en un sistema agroforestal de la parroquia El Carmelo, provincia del Carchi, Ecuador

Nota. Lesión con exudación observada en el tronco de un árbol adulto de *J. neotropica* durante las evaluaciones de campo del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). La imagen ilustra un caso de deterioro localizado de la corteza y los tejidos subyacentes, compatible con un proceso de cancro, cuya detección temprana permite implementar medidas preventivas y correctivas dentro del manejo sanitario adaptativo.

Los estudios realizados en el arbolado urbano complementan esta visión al demostrar que las condiciones ambientales modifican la incidencia de plagas y enfermedades. En Cuenca, Saldaña & Vera (2019) registraron áfidos, cochinillas,

defoliadores, barrenadores y diversos hongos asociados al estrés urbano, mientras que en Loja, Fernández et al. (2026) reportaron una baja incidencia de síntomas fitosanitarios visibles en *J. neotropica*, lo que confirma el buen comportamiento sanitario de la especie cuando recibe un manejo preventivo adecuado.

Desde la perspectiva del manejo sanitario adaptativo, la principal estrategia consiste en mantener árboles vigorosos mediante una adecuada selección del sitio, densidades apropiadas, podas correctamente ejecutadas y monitoreo permanente del estado fitosanitario. Cuando los niveles de daño superen los umbrales aceptables para los objetivos del manejo, las intervenciones deberán priorizar métodos culturales, biológicos y mecánicos, reservando el control químico para situaciones justificadas dentro de un programa de manejo integrado.

13.3.2 Manejo de plantas trepadoras competidoras

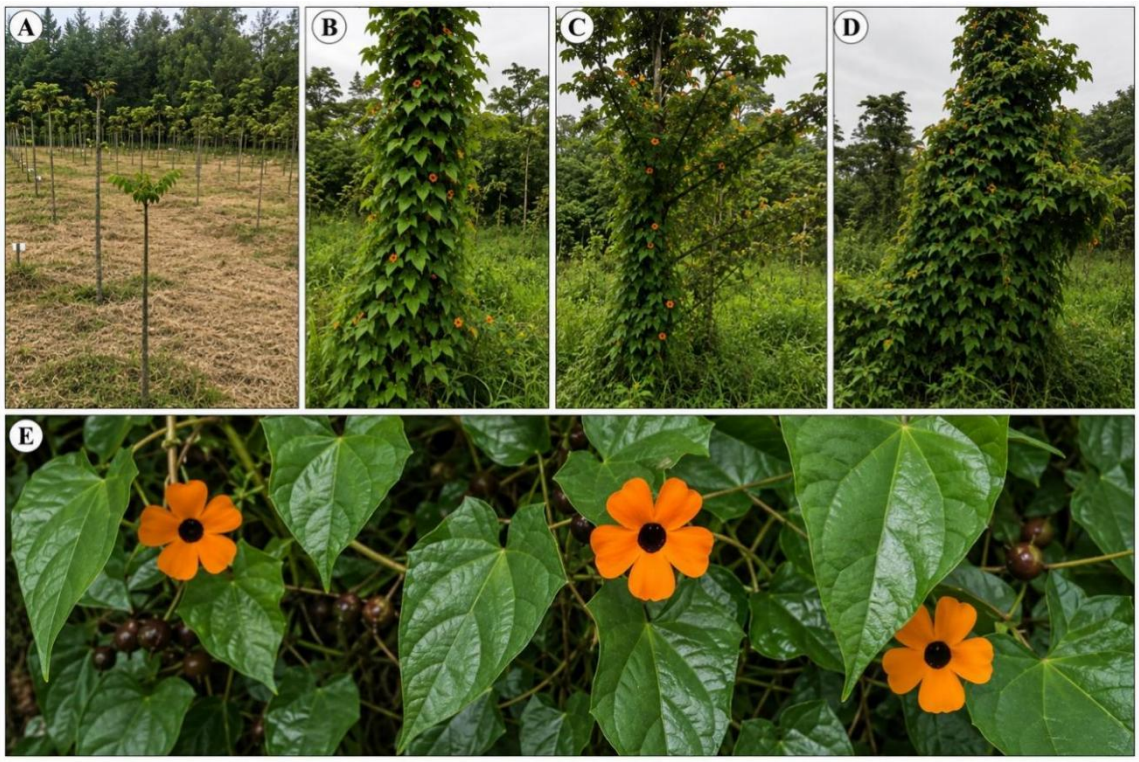
Las especies vegetales invasoras constituyen uno de los factores que pueden limitar el establecimiento, crecimiento y desarrollo de las plantaciones de *J. neotropica*, particularmente durante las primeras etapas de desarrollo del rodal. Además de competir por agua, luz y nutrientes, algunas especies trepadoras modifican la arquitectura de la copa, incrementan la carga mecánica sobre las ramas y reducen la eficiencia fotosintética cuando alcanzan elevadas coberturas. La magnitud de estos efectos depende de la especie invasora, la edad de la plantación, las condiciones del sitio y la intensidad del manejo silvicultural.

Entre las especies registradas en Ecuador, ***Thunbergia alata*** constituye uno de los ejemplos más representativos por su rápido crecimiento, elevada capacidad de dispersión y comportamiento trepador. Durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026) se observaron individuos colonizando plantaciones jóvenes de *J. neotropica*, donde la enredadera alcanzó rápidamente el dosel y cubrió parcialmente la copa de algunos árboles. Estas observaciones evidencian que, cuando no se controla oportunamente, la especie puede alterar la arquitectura natural del árbol, dificultar las labores de monitoreo y mantenimiento, e incrementar la competencia por la radiación solar.

La Figura 13.15 documenta la progresión de este proceso, desde una plantación con manejo adecuado de la vegetación hasta árboles con colonización avanzada por *Thunbergia alata*, así como las características morfológicas de la especie invasora.

Figura 13.15

Colonización progresiva de Thunbergia alata en plantaciones de Juglans neotropica



Nota. La secuencia fotográfica ilustra diferentes etapas de colonización de *Thunbergia alata* en plantaciones de *J. neotropica*. **(A)** Plantación con adecuado manejo de la vegetación competidora; **(B)** inicio de la colonización del fuste; **(C)** expansión de la enredadera hacia la copa; **(D)** árbol con colonización avanzada y cobertura extensa de la copa; y **(E)** detalle de las hojas y flores características de *Thunbergia alata*. La progresión observada evidencia la importancia de la detección temprana y del control oportuno de especies invasoras dentro del manejo sanitario adaptativo.

Desde la perspectiva del manejo sanitario adaptativo, el control de especies invasoras debe orientarse prioritariamente hacia la prevención y la detección temprana. Las inspecciones periódicas permiten intervenir antes de que las plantas trepadoras alcancen el dosel y reduzcan significativamente el crecimiento del árbol. En plantaciones jóvenes, la remoción manual o mecánica constituye generalmente la alternativa más recomendable, procurando eliminar las plantas invasoras sin ocasionar heridas al fuste ni daños al sistema radical de *J. neotropica*. Cuando la infestación es extensa, las intervenciones deberán complementarse con el manejo de la vegetación circundante y la reducción de disturbios que favorecen la colonización.

Las prácticas silviculturales también desempeñan un papel preventivo. Plantaciones con densidades adecuadas, árboles vigorosos y un programa regular de mantenimiento presentan menor susceptibilidad a la invasión de especies trepadoras. En consecuencia, el manejo de plantas invasoras no debe considerarse una actividad aislada,

sino parte integral del manejo sanitario adaptativo y del seguimiento periódico del estado del rodal.

13.3.3 Manejo de epífitas presentes en árboles adultos

Las epífitas constituyen un componente natural de los bosques montanos andinos y cumplen funciones ecológicas fundamentales relacionadas con la conservación de la biodiversidad, el almacenamiento de agua, el reciclaje de nutrientes y la provisión de hábitat para numerosos organismos. En árboles adultos de *J. neotropica* es frecuente observar comunidades de bromelias, orquídeas, helechos, musgos y líquenes que se desarrollan sobre el tronco y las ramas sin establecer una relación parasítica con el hospedero.

Desde la perspectiva del manejo silvicultural, la presencia de epífitas no debe interpretarse automáticamente como un problema sanitario. En bosques naturales y áreas destinadas a la conservación, estas comunidades representan un componente estructural del ecosistema y contribuyen al mantenimiento de múltiples procesos ecológicos. En consecuencia, su conservación debe considerarse parte de las estrategias de manejo orientadas a preservar la funcionalidad y complejidad del bosque.

Durante las evaluaciones realizadas en el marco del **Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026)** se registró la presencia frecuente y abundante de comunidades epifíticas sobre árboles adultos de *J. neotropica* en diferentes localidades del Ecuador. Estas observaciones evidencian el papel de la especie como árbol hospedero dentro de los paisajes andinos y destacan su importancia para los organismos asociados.

La Figura 13.16 ilustra la presencia de comunidades epifíticas sobre árboles adultos de *J. neotropica* en distintos contextos del paisaje andino ecuatoriano. Las imágenes muestran registros obtenidos en La Moya (Chimborazo), el bosque de El Tundo (Loja) y el Campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte (Imbabura)**,** evidenciando la presencia de estas comunidades sobre árboles de nogal en diferentes localidades y condiciones ecológicas.

Esta función como árbol hospedero ha sido documentada cuantitativamente en el sur del Ecuador. Medina et al. (2021) evaluaron la diversidad de briófitos epífitos en una plantación mixta de *J. neotropica* de aproximadamente 60 años y en un bosque montano secundario del Parque Universitario Francisco Vivar Castro, en Loja. En el conjunto del estudio se registraron 55 especies de briófitos; a escala del tipo de bosque se encontraron 41 especies en la plantación de *J. neotropica* y 42 en el bosque secundario, mientras que a escala de árbol la riqueza fue mayor en la plantación. La composición de las comunidades estuvo condicionada principalmente por la apertura del dosel, y el diámetro de los árboles mostró un efecto positivo sobre la riqueza de briófitos. Estos resultados evidencian que las plantaciones adultas del nogal pueden proporcionar sustrato y condiciones para el establecimiento de una diversidad considerable de epífitas; sin embargo, no sustituyen a los bosques naturales para la conservación de especies sensibles a condiciones de menor humedad y mayor exposición lumínica.

Figura 13.16

Comunidades de epífitas asociadas a árboles adultos de Juglans neotropica en diferentes contextos ecológicos del Ecuador

Nota. Epífitas asociadas a árboles adultos de *J. neotropica* en diferentes contextos del paisaje andino ecuatoriano. **A** y **B)** Nogales con abundantes epífitas en La Moya, Chimborazo. **C)** Epífitas sobre ramas de un nogal en el cerro Zañe, Loja. **D)** Nogal adulto con abundantes epífitas en un lindero del campus Yuyucocha, Universidad Técnica del Norte, Imbabura. Las epífitas son componentes naturales de los bosques andinos y, salvo situaciones particulares en plantaciones destinadas a la producción intensiva de madera, no requieren remoción sistemática. Fotografía C: Augusto Pinzón.

En contraste, el manejo puede diferir cuando los árboles se destinan principalmente a la producción de madera de alta calidad. En plantaciones comerciales, una acumulación excesiva de epífitas de gran tamaño puede incrementar la carga mecánica sobre las ramas, dificultar las labores de poda e inspección sanitaria o favorecer la retención prolongada de humedad sobre determinadas partes del árbol. En estos casos, cualquier intervención debe realizarse únicamente cuando exista una justificación técnica claramente demostrada y procurando minimizar la alteración de las comunidades epifíticas.

Por tanto, el manejo de las epífitas debe responder al objetivo de producción y al contexto ecológico del rodal. Mientras en bosques naturales y sistemas destinados a la conservación su mantenimiento constituye una práctica deseable por los servicios ecosistémicos que proporcionan, en plantaciones comerciales las decisiones deberán

fundamentarse en evaluaciones específicas del riesgo estructural, del estado sanitario y de los objetivos de manejo, evitando su remoción sistemática.

13.4 Aprovechamiento sostenible de *J. neotropica*

El aprovechamiento constituye la fase culminante del manejo silvicultural de *J. neotropica*, en la que las decisiones tomadas durante el establecimiento, la conducción del rodal y el manejo sanitario se traducen en la obtención de bienes y servicios bajo criterios de sostenibilidad. A diferencia de un enfoque extractivo, el aprovechamiento sostenible busca mantener simultáneamente la productividad, la capacidad de regeneración, la diversidad biológica y los múltiples beneficios ecológicos, económicos y socioculturales que caracterizan al nogal andino.

En este contexto, la decisión de aprovechar un rodal no debe fundamentarse únicamente en la edad cronológica de los árboles o en un diámetro mínimo de corta. La información epidométrica presentada en este capítulo demuestra que el crecimiento de *J. neotropica* responde a trayectorias diferenciadas según la calidad del sitio, el sistema de manejo, la densidad del rodal y las intervenciones silviculturales realizadas. En consecuencia, el momento del aprovechamiento debe interpretarse como una **decisión adaptativa**, sustentada en el estado de desarrollo del rodal, los objetivos de producción y las condiciones ecológicas específicas de cada sistema.

Desde esta perspectiva, el aprovechamiento de *J. neotropica* trasciende la obtención de madera. La especie ofrece oportunidades para la producción de productos forestales no madereros y la generación de servicios ecosistémicos, cuya consideración conjunta permite avanzar hacia esquemas de manejo de uso múltiple y diversificar los beneficios derivados de los sistemas forestales (Guariguata, 2013; Sabogal et al., 2013). Este enfoque resulta particularmente pertinente cuando una misma especie proporciona simultáneamente productos maderables y no maderables, situación en la que deben considerarse tanto las complementariedades como los posibles conflictos entre diferentes objetivos de aprovechamiento.

En concordancia con este enfoque, el presente apartado se organiza en cuatro componentes complementarios: (i) el aprovechamiento de productos madereros, con énfasis en los criterios técnicos que sustentan la definición de los diferentes turnos de aprovechamiento; (ii) el aprovechamiento sostenible de productos forestales no madereros, particularmente los derivados del fruto; (iii) el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos como una alternativa para diversificar los beneficios económicos y ambientales del manejo forestal; y (iv) un modelo integrado de aprovechamiento adaptativo que articula la producción de madera, los productos forestales no madereros y los servicios ecosistémicos a lo largo del ciclo biológico de la especie.

El aprovechamiento sostenible constituye, por tanto, una etapa del manejo forestal que trasciende la extracción de productos y se inserta en una perspectiva de uso múltiple. En la presente monografía, el enfoque de **Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM)** se adapta al aprovechamiento sostenible de *J. neotropica*, considerando a la especie como eje articulador de la producción de madera, productos forestales no madereros y servicios ecosistémicos en diferentes contextos ecológicos, productivos y socioeconómicos (Guariguata, 2013; Sabogal et al., 2013). Este planteamiento es consistente con la

concepción del MUM como un enfoque orientado a integrar múltiples bienes y servicios y a equilibrar objetivos productivos, ecológicos y sociales.

13.4.1 Criterios técnicos para definir el momento del aprovechamiento

La determinación del momento oportuno para el aprovechamiento constituye una de las decisiones más importantes dentro del manejo silvicultural de *J. neotropica*. Tradicionalmente, esta decisión se ha asociado con una edad de corta predeterminada o con el cumplimiento de determinados diámetros mínimos. Sin embargo, estos criterios resultan insuficientes cuando se pretende compatibilizar la producción de madera con la conservación de la biodiversidad, el aprovechamiento de productos forestales no madereros y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos.

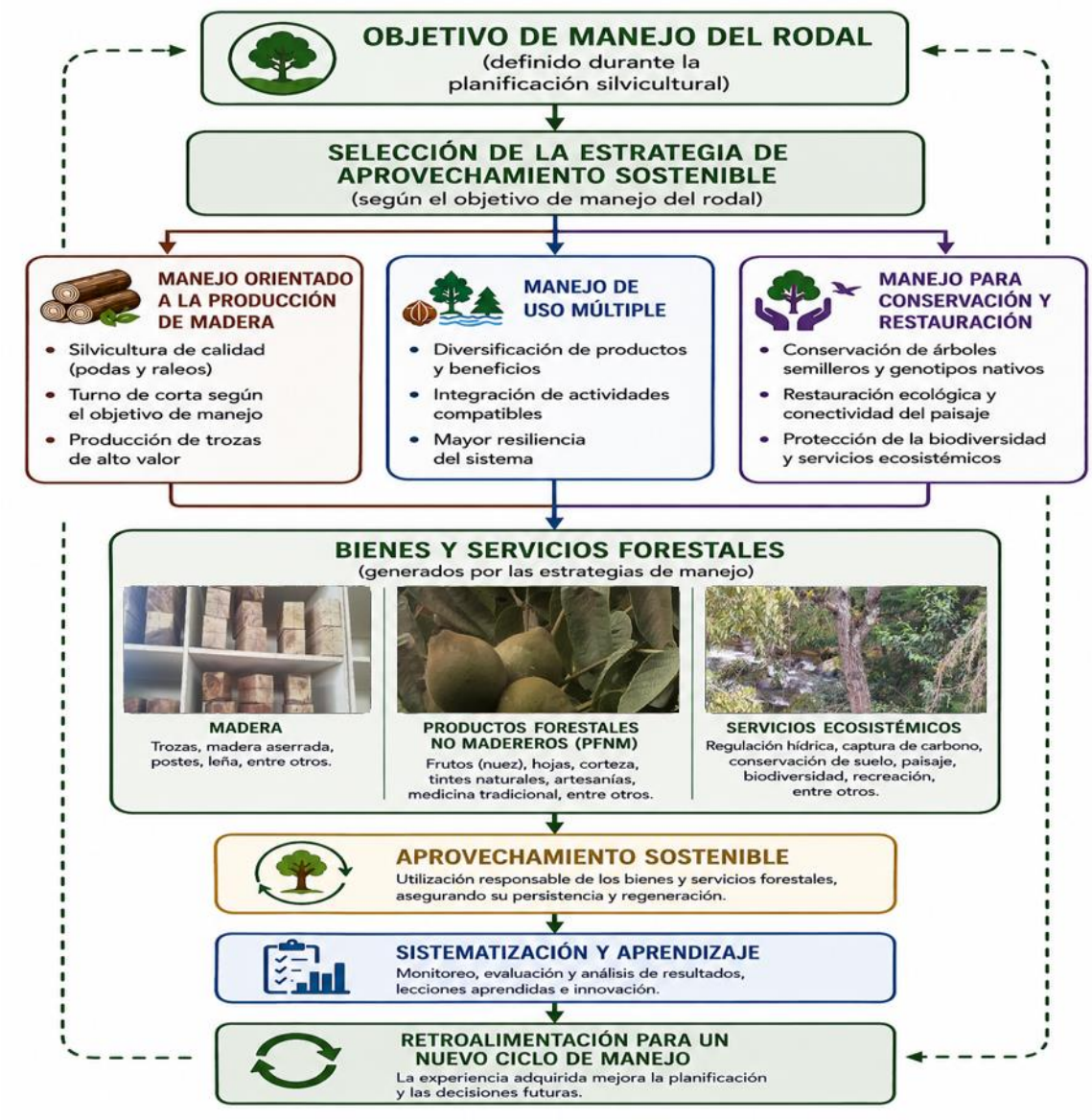
Las variables epidoméricas analizadas en este capítulo demuestran que las diferentes variables de crecimiento presentan patrones de desarrollo diferenciados durante el ciclo biológico del árbol. La expansión de la copa, el crecimiento diamétrico, la acumulación de área basal y la producción de volumen siguen trayectorias propias, de modo que la elección del momento de aprovechamiento depende del producto o servicio que se desee priorizar. En consecuencia, las curvas de crecimiento no deben interpretarse como herramientas para establecer una edad fija de corta, sino como instrumentos de apoyo para comprender la dinámica del rodal y fundamentar la toma de decisiones silviculturales.

Desde esta perspectiva, el aprovechamiento debe entenderse como un proceso de **manejo adaptativo**, en el cual las decisiones se ajustan periódicamente a partir de la información obtenida durante el seguimiento del rodal. Variables como el crecimiento observado, la calidad del sitio, el estado sanitario, la competencia entre árboles, la respuesta a los raleos, la regeneración natural y los objetivos de producción proporcionan criterios más robustos que una edad cronológica considerada de manera aislada. Este enfoque permite adaptar las intervenciones conforme evolucionan las condiciones del rodal y reducir el riesgo de aplicar decisiones rígidas que no respondan a la realidad de cada plantación o bosque.

En consecuencia, el momento del aprovechamiento debe interpretarse como una decisión adaptativa, sustentada en el estado de desarrollo del rodal, los objetivos de producción y las condiciones ecológicas específicas de cada sistema. La Figura 13.17 sintetiza los principales criterios técnicos que intervienen en la definición del momento del aprovechamiento de *J. neotropica*. Bajo un enfoque de manejo adaptativo, esta decisión integra información epidométrica, objetivos de manejo, condiciones del sitio y criterios de sostenibilidad, constituyendo la base para definir el turno de aprovechamiento más apropiado para cada unidad de manejo.

Figura 13.17

Modelo operativo para la selección de estrategias de aprovechamiento sostenible de Juglans neotropica según el objetivo de manejo del rodal



Nota. El esquema relaciona los objetivos de manejo de *J. neotropica* con tres estrategias: producción de madera, uso múltiple, y conservación y restauración. Las fotografías ilustran, de izquierda a derecha, madera, frutos y un árbol junto a un curso de agua. Fotografía de la madera: Yamberla (2023). Fotografía del árbol junto al curso de agua: Luis Granda.

Integración de los criterios para definir el turno de aprovechamiento

Bajo un enfoque de manejo adaptativo, el turno de aprovechamiento no responde a una edad fija ni a un único criterio dasométrico, sino a la integración de objetivos

biológicos, legales, económicos, sociales y ambientales, los cuales varían según las características del rodal y las metas de manejo (Figura 13.17).

Turno biológico (fundamento silvícola)

El turno biológico de corta (TBC) corresponde a la edad en la que el incremento medio anual (IMA) alcanza su máximo, condición que convencionalmente se identifica mediante su intersección con el incremento corriente anual (ICA). Desde una perspectiva silvícola, este indicador permite relacionar la edad con la dinámica de crecimiento y constituye una referencia para orientar decisiones de manejo y aprovechamiento, sin que deba interpretarse como una edad de corta única e invariable para la especie.

Como antecedente para *J. neotropica* en la región andina, Inga Guillén (2011), mediante el análisis de anillos de crecimiento en la Selva Central del Perú, estimó un TBC de **123 años**. En el sur del Ecuador, Cueva Castillo (2018) aplicó métodos dendrocronológicos en dos ecosistemas de la provincia de Loja y obtuvo resultados contrastantes. En Saraguro, donde los árboles presentaron un crecimiento diamétrico promedio de **8,34 mm/año**, el TBC se estimó en **34 años**; mientras que en el Parque Universitario de Educación Ambiental y Recreación "Francisco Vivar Castro" (PUEAR), con un crecimiento diamétrico promedio de **6,48 mm/año**, las series dendrocronológicas alcanzaron **65 años sin que las curvas del incremento corriente anual (ICA) y del incremento medio anual (IMA) llegaran a interceptarse**, por lo que el TBC fue **proyectado en 73 años**.

Posteriormente, Pucha et al. (2019), al analizar el turno biológico de corta de cinco especies forestales del sur del Ecuador, corroboraron para *J. neotropica* el comportamiento observado en el PUEAR. Las curvas del ICA y del IMA no alcanzaron su intersección dentro del período observado, por lo que sus tendencias fueron proyectadas y el TBC se estimó en **73 años**. Los autores señalaron, además, que el TBC se encuentra estrechamente relacionado con factores biogeográficos y con las condiciones de crecimiento, y destacaron la importancia de los primeros años de desarrollo y del manejo forestal para modificar el tiempo requerido para alcanzar este punto de culminación del crecimiento.

En conjunto, los valores reportados para *J. neotropica* —**123 años en la Selva Central del Perú, 34 años en Saraguro y 73 años proyectados para el PUEAR**— evidencian que el turno biológico no constituye una edad fija para la especie. Particularmente ilustrativa es la comparación entre los dos sitios estudiados en Loja: el mayor crecimiento diamétrico registrado en Saraguro estuvo asociado con un TBC considerablemente más temprano que el estimado para el PUEAR. Estos antecedentes indican que la edad de culminación del crecimiento responde a la interacción entre las condiciones del sitio, la dinámica de crecimiento y el manejo silvicultural. En consecuencia, **el TBC de *J. neotropica* debe determinarse para condiciones específicas de crecimiento y no adoptarse como un valor único para toda la especie**; además, cuando la intersección entre ICA e IMA se encuentra fuera del intervalo de edades efectivamente observado, debe diferenciarse explícitamente entre un TBC determinado dentro de la serie y un TBC obtenido mediante proyección.

Turno legal (fundamento normativo)

El turno legal está determinado por la normativa forestal vigente y establece las condiciones que deben cumplirse para autorizar el aprovechamiento de los recursos forestales. A diferencia del turno biológico, que responde a la dinámica de crecimiento de los árboles y a las condiciones del sitio, el turno legal se sustenta en criterios regulatorios, entre ellos los diámetros mínimos de corta, los instrumentos de manejo y los procedimientos de autorización establecidos por la autoridad ambiental.

En Ecuador, la *Norma para el manejo sustentable de los bosques andinos* establece específicamente para *J. neotropica* un **diámetro mínimo de corta (DMC) de 50 cm** (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2006). Este valor constituye un umbral normativo para el aprovechamiento de la especie y no debe interpretarse como equivalente a su turno biológico, debido a que el tiempo requerido para alcanzar dicho diámetro depende de la tasa de crecimiento, las condiciones del sitio y el manejo silvicultural.

En consecuencia, **el turno biológico y el criterio legal de aprovechamiento son conceptos diferentes pero complementarios**. El primero permite determinar, con fundamento en la dinámica de crecimiento, la edad de culminación del incremento medio; el segundo establece el diámetro mínimo exigido por la normativa para el aprovechamiento. Por ello, alcanzar un DMC de **50 cm** no implica necesariamente que el árbol haya alcanzado su turno biológico, ni el cumplimiento del turno biológico exime de observar los requisitos establecidos por la normativa forestal.

Turno económico (fundamento financiero)

El turno económico corresponde al momento en que el aprovechamiento genera la mayor rentabilidad posible, considerando el crecimiento del árbol, la calidad de la madera, los costos de manejo y las condiciones del mercado. En sistemas de uso múltiple, este criterio incorpora además el valor acumulado de los productos forestales no madereros y de otros beneficios obtenidos durante el desarrollo del rodal. **Para *J. neotropica*, la dimensión económica del manejo y los criterios de rentabilidad asociados con diferentes alternativas productivas se analizan con mayor detalle en el capítulo 14.**

Turno social (fundamento territorial)

El turno social reconoce que el aprovechamiento forestal también debe responder a las necesidades y expectativas de las comunidades, los propietarios y los diferentes actores vinculados al territorio. En consecuencia, la decisión de cosecha debe armonizar la producción con la generación de empleo, el fortalecimiento de medios de vida, la conservación del patrimonio biocultural y los beneficios que la sociedad obtiene del bosque. Desde esta perspectiva, el momento del aprovechamiento puede diferir del definido exclusivamente por criterios biológicos o económicos, en función de los objetivos y necesidades de los actores involucrados.

Turno climático (carbono y servicios ecosistémicos)

El turno climático integra la capacidad del rodal para capturar y almacenar carbono, así como el conjunto de servicios ecosistémicos asociados a la mitigación del cambio climático, la regulación ambiental y los mecanismos de compensación por servicios ecosistémicos. Bajo este criterio, el momento del aprovechamiento busca equilibrar la obtención de productos forestales con el mantenimiento de las funciones ecológicas que sustentan la sostenibilidad del paisaje.

En conjunto, estos cinco criterios evidencian que el turno de aprovechamiento constituye una decisión adaptativa sustentada en la integración de objetivos biológicos, legales, económicos, sociales y ambientales. En consecuencia, el momento del aprovechamiento no responde a una edad fija ni a un único indicador de crecimiento, sino a la combinación de criterios técnicos que permiten definir la estrategia más apropiada para cada unidad de manejo, de acuerdo con los principios del Manejo Forestal de Uso Múltiple (Guariguata, 2013; Sabogal et al., 2013). Esta integración de criterios constituye el fundamento técnico para orientar el aprovechamiento sostenible de los productos madereros, desarrollado en el siguiente apartado.

13.4.2 Aprovechamiento sostenible de productos madereros

La producción de madera constituye uno de los principales objetivos del manejo silvicultural de *J. neotropica* y representa la culminación de un proceso que se inicia con la selección del sitio, continúa con el establecimiento de la plantación y se desarrolla mediante podas, raleos y otras intervenciones orientadas a mejorar la calidad del fuste. En consecuencia, la calidad de la madera obtenida durante el aprovechamiento no depende exclusivamente de las características propias de la especie, sino del manejo aplicado a lo largo de todo el ciclo de desarrollo del rodal.

Desde esta perspectiva, el aprovechamiento debe planificarse de manera que preserve tanto el valor comercial de la madera como la capacidad productiva y ecológica del bosque. La selección de los árboles destinados a la corta requiere considerar simultáneamente el estado sanitario, la conformación del fuste, la presencia de defectos, el crecimiento observado, la estabilidad del rodal y los objetivos específicos del manejo. La decisión no debe basarse únicamente en la edad o el diámetro alcanzado, sino en una evaluación integral de la condición del árbol y de su contribución al desarrollo futuro del rodal.

En rodales manejados para la producción de madera de alta calidad, la selección de árboles para el aprovechamiento debe favorecer individuos que hayan alcanzado las dimensiones y características tecnológicas requeridas por el mercado, manteniendo al mismo tiempo ejemplares de buena conformación para asegurar la continuidad estructural del bosque, conservar la variabilidad genética y facilitar la regeneración natural cuando esta constituya uno de los objetivos del manejo.

Las operaciones de aprovechamiento también deben ejecutarse bajo criterios de impacto reducido, minimizando los daños sobre los árboles remanentes, la regeneración establecida y el suelo forestal. La planificación de las vías de extracción, la dirección controlada del apeo y la organización de las actividades de desembosque contribuyen a

disminuir las pérdidas de madera, reducir la compactación del suelo y conservar la estabilidad del ecosistema. Estos principios son igualmente aplicables en plantaciones, sistemas agroforestales y bosques nativos, aunque las técnicas específicas deberán adaptarse a las características particulares de cada sistema de producción.

La calidad final de la madera depende igualmente del manejo realizado inmediatamente después de la corta. Una adecuada clasificación de las trozas, la protección frente al exceso de humedad, la prevención de grietas y el transporte oportuno permiten conservar las propiedades tecnológicas descritas en el capítulo 11 y maximizar el valor agregado del producto. En este sentido, el aprovechamiento constituye una fase más del proceso silvicultural y no una actividad independiente del manejo desarrollado durante el crecimiento del rodal.

La Figura 13.18 sintetiza la secuencia técnica del aprovechamiento sostenible de productos madereros, desde la evaluación previa de los árboles hasta el manejo inicial de las trozas, integrando los principales criterios que permiten conservar la calidad de la madera y reducir los impactos sobre el rodal.

Figura 13.18

Secuencia técnica para el aprovechamiento sostenible de productos madereros de Juglans neotropica

Nota. **A)** Árbol seleccionado para aprovechamiento en el PUEAR–La Argelia, Loja; **B)** medición y cubicación de trozas después del apeo; **C)** madera aserrada en la que se aprecia el veteado de *Juglans neotropica*; **D)** producto elaborado con madera de nogal. Las fotografías ilustran etapas del aprovechamiento y la transformación de la madera. Fotografía B: Cunduri (2026).

13.4.3. Criterios para el aprovechamiento sostenible de productos forestales no madereros

Los productos forestales no madereros (PFNM) constituyen uno de los principales componentes del enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM), al permitir la obtención de bienes forestales sin requerir el aprovechamiento del árbol completo (Guariguata, 2013; Sabogal et al., 2013). En *J. neotropica*, estos productos comprenden no solamente la nuez destinada al consumo, sino también la pulpa (mesocarpo), el endocarpo (cuesco), las hojas y la corteza, utilizadas tradicionalmente para la obtención de tintes naturales, compuestos fenólicos, taninos, artesanías y otros productos de valor agregado, aspectos desarrollados en el capítulo 11.

Desde la perspectiva del manejo forestal sostenible, el aprovechamiento de estos productos debe considerarse una consecuencia del manejo silvicultural desarrollado durante todo el ciclo de vida del árbol. La disponibilidad de frutos, hojas o corteza aprovechables depende del vigor del individuo, de la conformación de la copa, del estado sanitario, de las condiciones de crecimiento y de la planificación del manejo, por lo que su extracción debe realizarse bajo criterios que aseguren la permanencia del recurso, la conservación de la capacidad reproductiva y el mantenimiento de las funciones ecológicas del bosque.

La productividad de los frutos ha sido evaluada en diferentes sistemas de manejo del norte del Ecuador. Vallejos et al. (2023), mediante una prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis aplicada al potencial productivo del nogal en sistemas agroforestales, plantaciones, árboles dispersos, linderos y silvicultura urbana, determinaron que no existen diferencias estadísticas significativas entre estos sistemas. No obstante, los árboles dispersos presentaron el mayor promedio de frutos por individuo, seguidos por las plantaciones, la silvicultura urbana y los árboles establecidos en linderos. Estos resultados sugieren que la producción de frutos responde principalmente a factores relacionados con la disponibilidad de luz, el desarrollo de la copa y la competencia por recursos, más que al sistema de manejo propiamente dicho.

Estos resultados coinciden con las observaciones de Cueva (2018), quien destacó la capacidad adaptativa de *J. neotropica* bajo diferentes condiciones agroecológicas, y con Guamán (2023), quien señala que la variabilidad fenotípica observada en sistemas agroforestales no necesariamente se traduce en diferencias significativas de productividad, sino en una elevada plasticidad ecológica que permite mantener una producción relativamente estable en distintos ambientes.

Con el propósito de caracterizar el potencial de aprovechamiento integral de los principales productos forestales no madereros derivados del fruto, el Programa de Investigación *Juglans* realizó un análisis biométrico de frutos maduros recolectados en diciembre de 2025 en la parroquia Cahuasquí (Imbabura), dentro de la iniciativa familiar Bodega Orgánica Cahuasquí. Se determinó el peso fresco y la proporción relativa del exocarpo, mesocarpo, endocarpo y nuez, generando información técnica orientada a fortalecer procesos de transformación, comercialización y bioeconomía rural (Figura 13.19).

La Figura 13.19 sintetiza el proceso de aprovechamiento integral del fruto de *J. neotropica*, mostrando sus principales componentes, su participación relativa en el peso total del fruto y las alternativas de valorización como productos forestales no madereros. Este esquema evidencia que el potencial económico del fruto trasciende el consumo de la nuez e incorpora materias primas destinadas a la obtención de tintes naturales, artesanías y otros productos de valor agregado, en concordancia con el enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple (Guariguata, 2013; Sabogal et al., 2013).

Figura 13.19

Aprovechamiento integral del fruto de Juglans neotropica y potencial de sus principales productos forestales no madereros

Nota. La figura resume el proceso de separación del fruto en sus principales componentes (mesocarpo, endocarpo y nuez) y sus alternativas de aprovechamiento como productos forestales no madereros. Los porcentajes corresponden a la proporción promedio obtenida en frutos maduros recolectados en diciembre de 2025 en la empresa familiar Bodega Orgánica Cahuasquí, parroquia Cahuasquí, provincia de Imbabura, en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Los resultados muestran que el mayor potencial de valorización corresponde al mesocarpo (pulpa), que representa aproximadamente el 59 % del peso del fruto y constituye la principal materia prima para la obtención de tintes naturales y extractos ricos en compuestos fenólicos. El endocarpo (22 %) presenta un importante potencial para

artesanías y otros usos culturales, mientras que la nuez, aunque representa únicamente alrededor del 1 % del peso total, posee un alto valor alimenticio y gastronómico. Esta distribución confirma que el aprovechamiento sostenible del fruto debe orientarse hacia una valorización integral de todos sus componentes y no exclusivamente hacia la almendra comestible.

Los valores biométricos obtenidos para cada componente del fruto se presentan en la Tabla 13.8, la cual resume el peso promedio, la participación relativa y el principal uso potencial de cada producto forestal no maderero.

Tabla 13.8

Peso y proporción de las partes del fruto de Juglans neotropica con potencial como PFNM

Parte del fruto	Uso principal como PFNM	Peso promedio (g)	Proporción (%)
1.-Exocarpo / Epicarpio (piel)	Subproducto potencial, compostaje, extractos	**15-18**	**18**
2.-Pulpa (mesocarpo)	Extracción de tintes naturales	**46-59**	**59**
3.-Semilla / Endocarpo (cuesco)	Artesanías y usos culturales	**19-22**	**22**
4.-Nuez	Consumo gastronómico y procesos industriales	**1-2**	**1**
Total fruto		**86-100**	**100**

Nota. Valores obtenidos a partir de frutos maduros recolectados en Cahuasquí, provincia de Imbabura (2 400 m s. n. m.), diciembre de 2025.

En conjunto, la evidencia disponible indica que el aprovechamiento sostenible de los PFNM en *J. neotropica* depende de una adecuada planificación del manejo silvicultural, del mantenimiento de árboles vigorosos y de la valorización integral de los diferentes productos derivados del fruto, las hojas y la corteza. Bajo este enfoque, los PFNM constituyen una alternativa complementaria a la producción de madera, fortalecen el enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple y generan nuevas oportunidades para el desarrollo de cadenas de valor y procesos de bioeconomía en los paisajes forestales andinos.

13.4.4. Aprovechamiento sostenible de los servicios ecosistémicos

Dentro del enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM), los servicios ecosistémicos constituyen una alternativa complementaria al aprovechamiento de la madera y de los productos forestales no madereros, al generar beneficios ecológicos, sociales y económicos que fortalecen la sostenibilidad del manejo forestal (Guariguata, 2013; Sabogal et al., 2013). En *J. neotropica*, estos servicios representan una oportunidad para diversificar las funciones productivas del bosque y ampliar las posibilidades de valorización del recurso, sin comprometer la integridad ecológica de los ecosistemas.

La integración del nogal andino en bosques naturales, sistemas agroforestales y plantaciones permite mantener procesos ecológicos esenciales relacionados con la captura y almacenamiento de carbono, la regulación hídrica, la conservación del suelo, la formación de microclimas, la conectividad ecológica y el mantenimiento de la biodiversidad. Estos beneficios, ampliamente documentados en los capítulos precedentes, constituyen la base para el desarrollo de mecanismos de compensación por servicios ecosistémicos, proyectos de restauración ecológica, programas de adaptación al cambio climático y otras estrategias orientadas a reconocer el valor de las funciones ambientales que desempeña la especie.

En el caso de *J. neotropica*, diversos estudios realizados en Ecuador han cuantificado carbono almacenado en distintos componentes de sistemas donde participa la especie. Las estimaciones varían según el reservorio considerado, la edad, densidad, estructura y condiciones del sitio. Cuando se incorpora el carbono orgánico del suelo, debe reconocerse que este reservorio responde a procesos acumulativos asociados con el uso previo del terreno, la vegetación, las propiedades edáficas y el manejo, por lo que no puede atribuirse exclusivamente a la presencia de *J. neotropica*. En sistemas agroforestales con *C. arabica*, la presencia del componente arbóreo puede modificar las condiciones de radiación y microclima experimentadas por el cultivo asociado.

El aprovechamiento sostenible de estos servicios trasciende las funciones ecológicas del árbol e incorpora beneficios culturales y sociales asociados a la conservación del patrimonio natural y del paisaje. La presencia de *J. neotropica* en espacios urbanos y rurales contribuye al bienestar de las comunidades mediante la provisión de sombra, la mejora de la calidad paisajística, el fortalecimiento de la identidad territorial y la conservación del patrimonio biocultural desarrollado alrededor de la especie, aspectos analizados en los capítulos precedentes.

Desde la perspectiva del manejo forestal sostenible, el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos no implica necesariamente la extracción directa de bienes materiales, sino la conservación y gestión de los procesos ecológicos que generan beneficios para la sociedad. La información biofísica sobre estos servicios puede contribuir a evaluar mecanismos de reconocimiento o compensación, cuya implementación requiere adicionalmente criterios legales, económicos, institucionales y de adicionalidad. La planificación debe orientarse a mantener árboles vigorosos, rodales funcionales y paisajes conectados, en concordancia con el enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple (Guariguata, 2013; Sabogal et al., 2013).

En este contexto, los servicios ecosistémicos constituyen el tercer componente del aprovechamiento sostenible de *J. neotropica*, complementando la producción de madera y de productos forestales no madereros, y consolidando un modelo de manejo capaz de integrar objetivos de conservación, producción y desarrollo territorial.

13.4.5. Modelo integrado de aprovechamiento adaptativo durante el ciclo biológico de *J. neotropica*

El enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM) reconoce que una misma unidad de manejo puede generar, de manera simultánea y sucesiva, diferentes bienes y servicios forestales a lo largo de su desarrollo, integrando objetivos de producción,

conservación y bienestar social (Guariguata, 2013; Sabogal et al., 2013). En *J. neotropica*, este principio se expresa mediante un modelo de aprovechamiento adaptativo, en el cual las decisiones silviculturales evolucionan conforme avanza el ciclo biológico de la especie, permitiendo diversificar progresivamente los beneficios derivados del bosque sin comprometer su sostenibilidad.

A diferencia de los esquemas tradicionales centrados exclusivamente en la producción de madera al final del turno, el modelo propuesto incorpora desde las primeras etapas del desarrollo del rodal oportunidades para el aprovechamiento sostenible de productos forestales no madereros y de servicios ecosistémicos. En consecuencia, el manejo deja de responder a un único objetivo productivo y se convierte en un proceso dinámico de planificación, evaluación y adaptación, donde las intervenciones silviculturales generan nuevas oportunidades de valorización conforme cambian la estructura y el funcionamiento del ecosistema forestal.

Durante las etapas iniciales predominan las labores de establecimiento y formación del rodal. Las podas y otras intervenciones pueden generar biomasa residual que podría evaluarse como materia prima para determinados productos, dependiendo de su composición y viabilidad técnica y económica. Paralelamente, el crecimiento de los árboles modifica progresivamente la estructura y las condiciones microclimáticas del sistema.

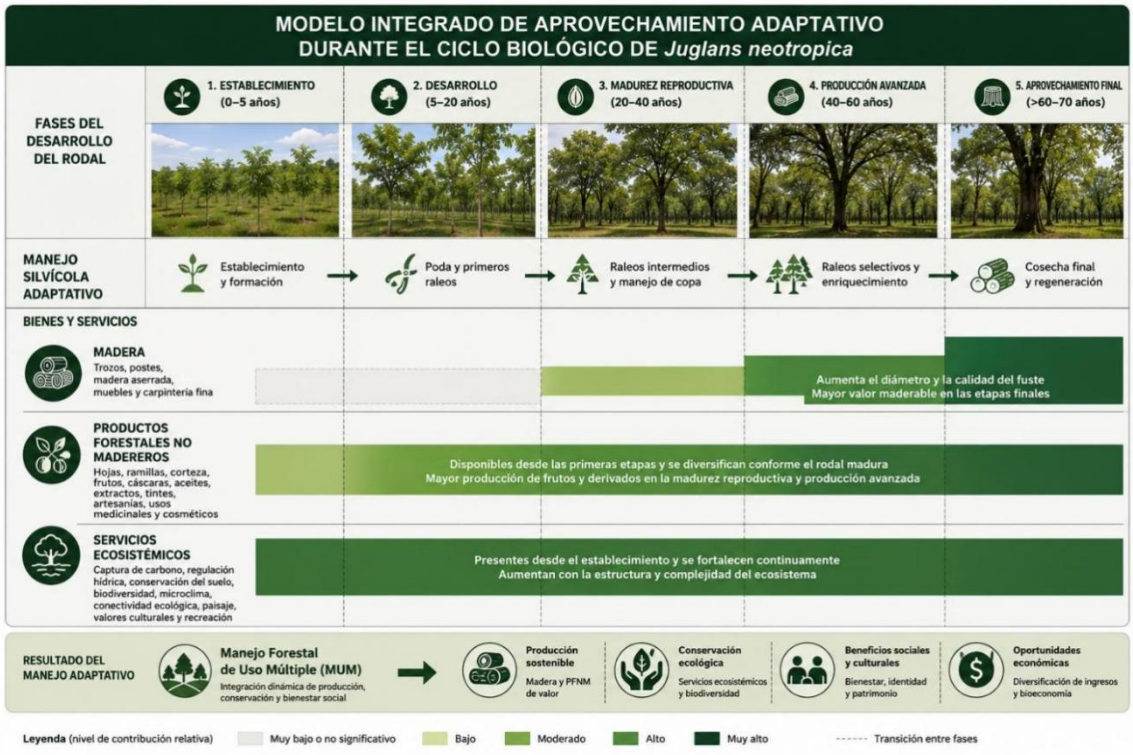
A medida que los árboles alcanzan la madurez reproductiva, el aprovechamiento puede diversificarse mediante la producción de frutos, cuya magnitud puede variar entre años, sitios e individuos. Esta producción puede complementar otros bienes y servicios del sistema, incluidos recursos para fauna, regeneración natural y funciones ecosistémicas asociadas con la permanencia del componente arbóreo.

En las etapas avanzadas del desarrollo, el incremento del diámetro y la calidad del fuste permite orientar progresivamente el aprovechamiento hacia productos maderables de mayor valor agregado, manteniendo durante todo el ciclo la provisión de servicios ecosistémicos y la obtención de productos forestales no madereros. De esta manera, la cosecha final de madera representa únicamente una de las múltiples expresiones del manejo forestal y no el único objetivo del sistema.

La Figura 13.20 sintetiza este modelo integrado de aprovechamiento adaptativo, mostrando cómo la producción de madera, los productos forestales no madereros y los servicios ecosistémicos se articulan dinámicamente a lo largo del ciclo biológico de *J. neotropica*. Bajo esta perspectiva, el aprovechamiento sostenible deja de entenderse como una actividad puntual de extracción y pasa a concebirse como un proceso continuo de generación de bienes y servicios, sustentado en la adaptación permanente de las decisiones de manejo y en la retroalimentación del conocimiento generado durante cada etapa del desarrollo del rodal.

Figura 13.20

Modelo integrado de aprovechamiento adaptativo durante el ciclo biológico de Juglans neotropica bajo el enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM)



Nota. La figura representa conceptualmente la evolución del aprovechamiento de madera, productos forestales no madereros y servicios ecosistémicos durante las principales fases del desarrollo de *J. neotropica*. El modelo integra criterios silvícolas, ecológicos y productivos con fines de planificación del manejo forestal sostenible.

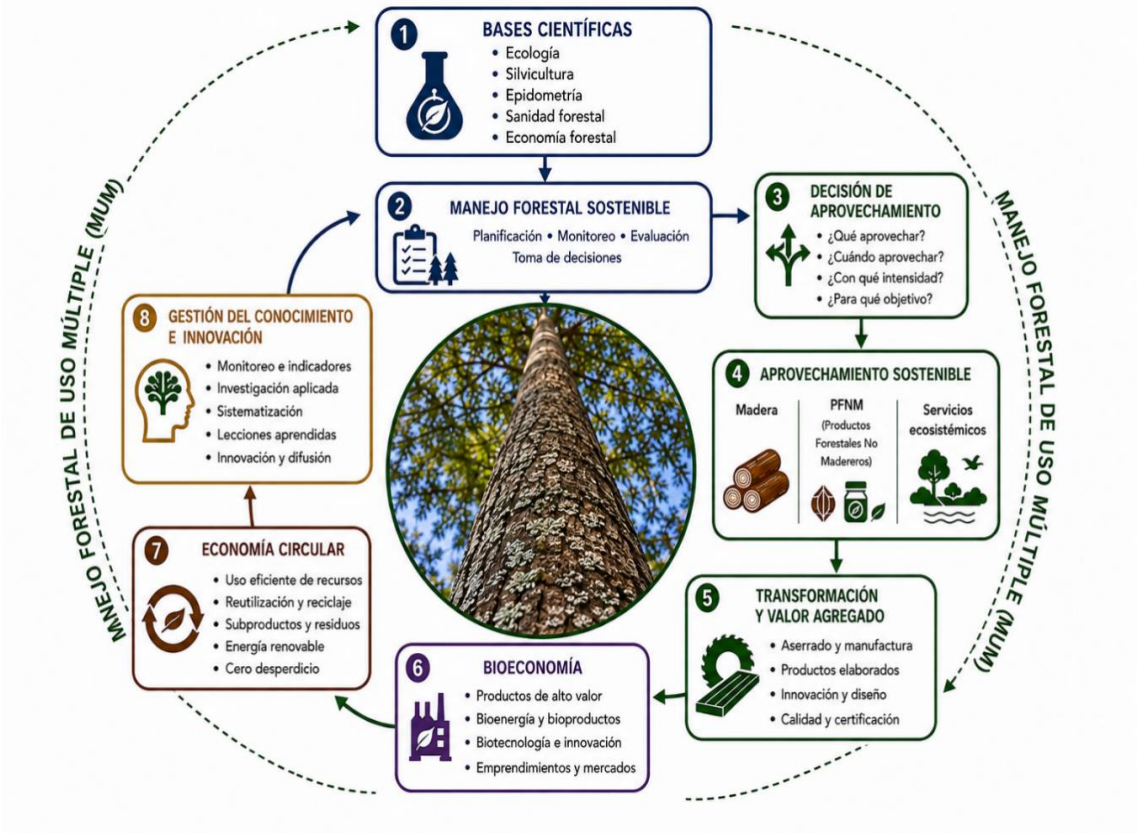
13.5 Integración del manejo forestal hacia la bioeconomía

El manejo forestal sostenible de *J. neotropica* constituye un proceso continuo en el que las decisiones silviculturales adoptadas durante el establecimiento, la conducción del rodal y el aprovechamiento generan información que retroalimenta permanentemente la planificación futura. Desde esta perspectiva, el aprovechamiento no representa la etapa final del manejo, sino un componente de un ciclo adaptativo orientado a integrar producción, conservación, innovación y aprendizaje.

La Figura 13.21 resume conceptualmente la articulación entre el manejo silvicultural desarrollado en los apartados precedentes y las diferentes alternativas de aprovechamiento sostenible de *J. neotropica*. El modelo representa que las decisiones de manejo y aprovechamiento deben sustentarse en evidencia científica y evolucionar mediante un proceso continuo de retroalimentación, orientado al manejo forestal sostenible, la bioeconomía, la economía circular y la sostenibilidad de los paisajes andinos.

Figura 13.21

Modelo conceptual del aprovechamiento sostenible de Juglans neotropica, adaptado del enfoque de Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM) desarrollado por Guariguata, 2013 y Sabogal et al., 2013, con énfasis en la bioeconomía y la economía circular

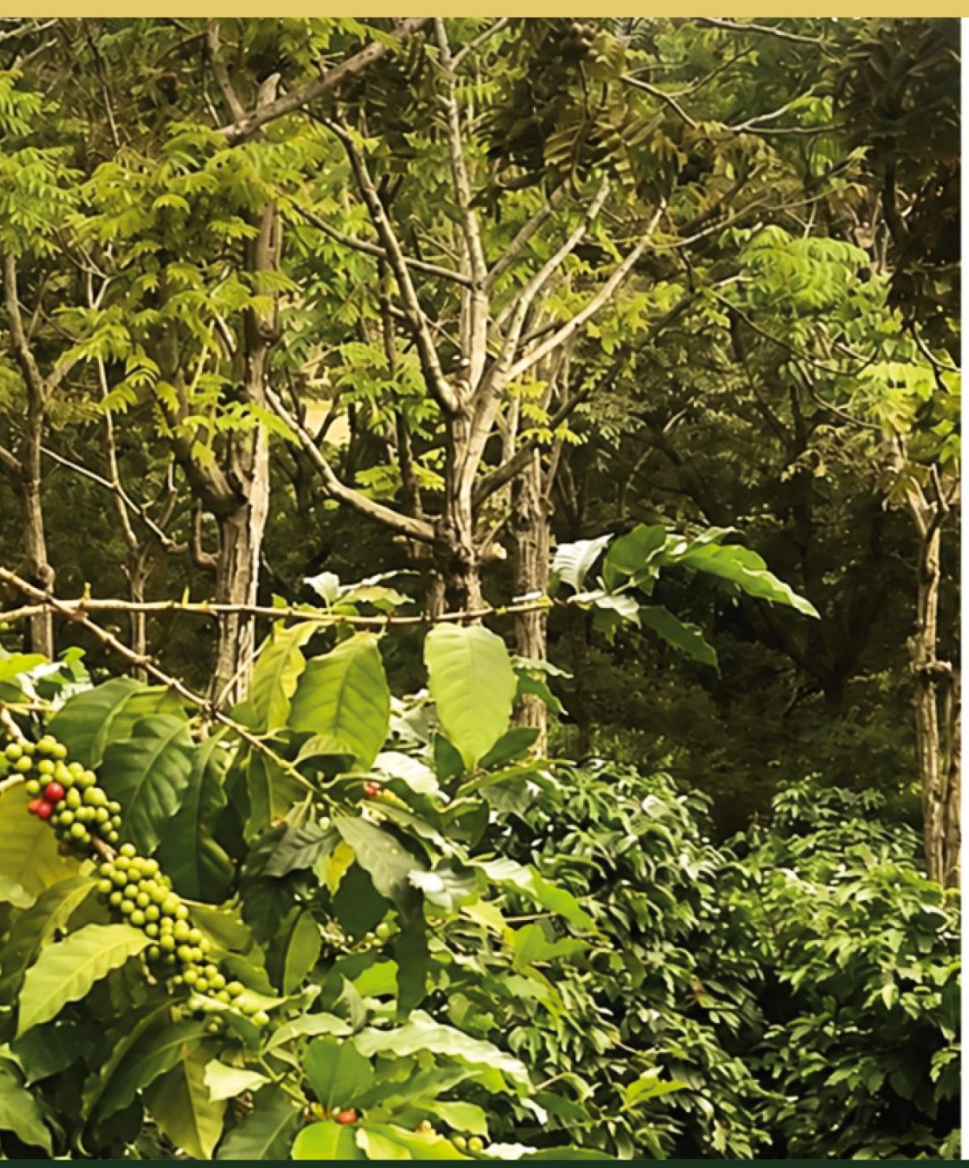


Nota. Modelo conceptual elaborado para la presente monografía a partir del enfoque de **Manejo Forestal de Uso Múltiple (MUM)** propuesto por Guariguata, 2013 y Sabogal et al., 2013, adaptado al manejo y aprovechamiento sostenible de *J. neotropica*. El esquema integra las bases científicas, el manejo forestal sostenible, la toma de decisiones adaptativa, la generación de bienes y servicios forestales, la creación de valor agregado mediante la bioeconomía y la economía circular, y la gestión del conocimiento como un proceso continuo de aprendizaje y retroalimentación para la mejora permanente del manejo forestal. Fotografía central: árbol de *J. neotropica* en el Campus Yuyucocha, Universidad Técnica del Norte, Ecuador.

Esta visión amplía el enfoque centrado exclusivamente en la producción maderera y reconoce que el valor de la especie se construye progresivamente mediante la interacción entre conocimiento científico, manejo silvicultural, innovación y valorización sostenible de los bienes y servicios forestales.

Sobre esta base, el capítulo siguiente aborda la bioeconomía y las cadenas de valor de *J. neotropica*, analizando cómo estos principios pueden traducirse en oportunidades para fortalecer la competitividad, la restauración de paisajes y el desarrollo sostenible de los territorios andinos.

CAPÍTULO 14



Economía, bioeconomía y cadenas de valor de *Juglans neotropica* en los paisajes andinos del Ecuador

Capítulo

14

Economía, bioeconomía y cadenas de valor de *Juglans neotropica* en los paisajes andinos del Ecuador

A) Árboles de *J. neotropica* integrados en un sistema agroforestal con café en Pimampiro, Imbabura. **B)** Frutos de *J. neotropica* en Alausí, Chimborazo. **C)** Evaluación de piezas aserradas de madera de *J. neotropica* en la Central de Innovación de la Madera de la Universidad Técnica del Norte, campus Yuyucocha, Imbabura, Ecuador. Fotografías A y B: Mario Añazco; fuente de la fotografía C: Cunduri (2026).

14.1. Enfoque metodológico y fuentes de información

El análisis económico, financiero, bioeconómico y de cadenas de valor desarrollado en este capítulo se sustentó en una **estrategia metodológica integradora**, que combinó información primaria generada en el marco del Programa de Investigación *Juglans*, resultados de investigaciones realizadas en Ecuador, registros obtenidos mediante trabajo de campo y ejercicios de modelamiento financiero construidos a partir de parámetros técnicos y económicos explícitamente identificados.

Esta combinación permitió diferenciar tres categorías de información: **i) datos empíricos observados**, obtenidos directamente en viveros, plantaciones, sistemas agroforestales y cadenas de comercialización; **ii) información secundaria documentada**, procedente de tesis, publicaciones científicas, documentos institucionales y estudios sectoriales; y **iii) parámetros asumidos para modelamiento**, utilizados para construir escenarios financieros de largo plazo cuando no se dispuso de series empíricas completas.

En consecuencia, los resultados del capítulo no deben interpretarse como predicciones determinísticas sobre el comportamiento futuro de *Juglans neotropica* o de sus mercados, sino como **escenarios de evaluación económica y financiera**, sustentados en la mejor información disponible para el contexto ecuatoriano. Esta distinción resulta especialmente importante debido al largo horizonte productivo de la especie y a la incertidumbre inherente a variables como crecimiento, productividad, precios, costos, demanda y condiciones de financiamiento.

14.1.1. Fuentes de información y análisis de costos

La estimación de costos de producción de plántulas se fundamentó en registros generados en el vivero forestal de Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte y en investigaciones desarrolladas dentro del Programa *Juglans*, complementadas con tesis y estudios realizados en otras instituciones del país. Para su análisis se empleó la clasificación convencional entre **costos fijos y costos variables**, identificando posteriormente el costo total y, cuando la información lo permitió, el costo unitario de producción.

Los costos fijos incluyeron aquellos componentes que no varían directamente con el número de unidades producidas durante un ciclo determinado, como infraestructura, herramientas, equipos y parte de los costos administrativos. Los costos variables comprendieron principalmente semillas, sustratos, insumos, fertilizantes, bioinsumos, materiales, energía, transporte y mano de obra directamente asociada a las actividades de producción.

Para el establecimiento y manejo de plantaciones se utilizaron datos procedentes de investigaciones desarrolladas en la Universidad Técnica del Norte y otras instituciones ecuatorianas, junto con registros de campo generados durante el seguimiento de plantaciones y sistemas agroforestales con *J. neotropica*. Los componentes considerados incluyeron preparación del terreno, adquisición y transporte de plantas, plantación,

replante, fertilización, mantenimiento, podas, raleos, herramientas, asistencia técnica y administración, dependiendo de la estructura de costos disponible en cada estudio.

Los ingresos asociados a productos madereros y no madereros se obtuvieron a partir de registros y consultas efectuadas en la provincia de Imbabura sobre comercialización de madera, nueces y productos derivados, complementados con información procedente de investigaciones específicas. Cuando un valor correspondió a una observación puntual de mercado, se mantuvo identificado como tal; cuando se utilizó para representar condiciones futuras del sistema, fue tratado como **parámetro de escenario**.

Para evitar atribuir una precisión superior a la que permiten los datos disponibles, los valores proyectados se expresan mediante cifras económicamente significativas y, salvo cuando se reproducen resultados originales de una fuente específica, se evita el uso innecesario de decimales.

Los valores utilizados en los ejercicios integrados de evaluación financiera se expresan en **dólares estadounidenses constantes de 2 025 (USD 2 025)**. Los valores históricos provenientes de estudios anteriores se mantienen en sus unidades monetarias originales cuando el propósito es realizar una comparación documental entre fuentes; cuando estos valores se incorporaron como parámetros de un mismo escenario financiero, se expresaron en términos comparables con el año monetario de referencia.

14.1.2. Evaluación financiera y modelamiento bioeconómico

La evaluación financiera se realizó mediante la construcción de flujos de caja que integran los costos de establecimiento, manejo y aprovechamiento con los ingresos esperados provenientes de madera, nueces y, en determinados escenarios agroforestales, productos agrícolas complementarios. Se consideraron los momentos de ocurrencia de cada costo e ingreso durante el horizonte temporal del sistema.

Los principales indicadores utilizados fueron el **Valor Actual Neto (VAN)**, la **Tasa Interna de Retorno (TIR)** y la **relación Beneficio/Costo (B/C)**. El VAN se estimó como la suma de los flujos netos actualizados durante el horizonte de evaluación:

$$VAN = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}$$

donde B_t representa los beneficios en el año t, C_t los costos correspondientes al mismo periodo, r la tasa de descuento y n el horizonte temporal de la evaluación.

La TIR corresponde a la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero y se utilizó como indicador complementario de rentabilidad. La relación B/C se obtuvo mediante el cociente entre el valor presente de los beneficios y el valor presente de los costos; valores superiores a uno indican que, bajo los supuestos considerados, los beneficios actualizados superan a los costos actualizados.

Como escenario financiero de referencia se adoptó una **tasa de descuento anual del 12 %**. Esta selección posee dos fundamentos complementarios. Por una parte, Castillo y Zhangallimbay (2021) señalan que en Ecuador se ha empleado tradicionalmente una tasa fija cercana al 12 % para la evaluación de proyectos, asociada al costo de oportunidad de los recursos y a criterios administrativos de planificación.

Por otra parte, como referencia contemporánea del costo del financiamiento productivo, las tasas activas efectivas máximas establecidas para diciembre de 2025 por la Junta de Política y Regulación Financiera y Monetaria fueron de **12,33 % para el segmento Productivo Empresarial y 11,90 % para Productivo PYMES** (Banco Central del Ecuador [BCE], 2025).El promedio simple de ambas tasas corresponde aproximadamente a 12,12 %, por lo que se adoptó **12 % como tasa representativa y redondeada para el escenario financiero base**.

Es importante señalar que las tasas de 11,90 % y 12,33 % corresponden a tasas activas efectivas máximas del sistema financiero y **no constituyen, por sí mismas, tasas de descuento forestal**. Su utilización en este capítulo tiene el propósito de ofrecer una referencia contemporánea del costo del financiamiento productivo en Ecuador y respaldar la razonabilidad del 12 % adoptado como parámetro del escenario.

Debido a que *J. neotropica* corresponde a una especie forestal de largo plazo, la tasa de descuento ejerce una influencia considerable sobre la valoración presente de los ingresos futuros. Por esta razón, cuando la información disponible lo permita, el escenario base del 12 % podrá contrastarse mediante **análisis de sensibilidad con tasas inferiores**, particularmente 8 % y 10 %, sin sustituir el 12 % como referencia central del modelamiento.

Los indicadores obtenidos mediante VAN, TIR y B/C deben interpretarse dentro de los supuestos técnicos y económicos establecidos para cada escenario. Variables como productividad final de madera, producción anual de nueces, precios futuros, costos de manejo y duración del turno no se consideran constantes conocidas, sino parámetros sujetos a incertidumbre. En consecuencia, en las tablas de modelamiento se identificó claramente si sus valores proceden de **observaciones empíricas, fuentes documentales o supuestos de simulación**.

14.1.3. Análisis de cadenas de valor

El análisis de las cadenas de valor se fundamentó conceptualmente en el enfoque metodológico desarrollado por la cooperación técnica alemana para el análisis y fomento de cadenas de valor (Weiskopf & Landero, 2011). Desde esta perspectiva, una cadena comprende el conjunto articulado de procesos que se extiende desde los proveedores de insumos y la producción primaria hasta el procesamiento y la comercialización, incluyendo los servicios de apoyo asociados. Este enfoque permite diferenciar una cadena productiva, entendida como la relación existente entre actores que participan en un mercado, de una cadena de valor, caracterizada por una mayor articulación estratégica e interdependencia entre sus participantes, orientación hacia la demanda, compromiso con la calidad y generación de beneficios compartidos.

Como antecedentes metodológicos se consideraron los estudios de las cadenas de producción y consumo del bambú realizados en Ecuador y Perú (Añazco Romero & Rojas, 2015a, 2015b). En estas investigaciones, las unidades de análisis correspondieron a los diferentes **eslabones comprendidos entre la producción y el consumidor final**, examinados desde dimensiones técnico-tecnológicas, económico-financieras y sociales. La metodología combinó revisión documental, entrevistas específicas para cada eslabón, visitas de campo, observación directa y consulta a especialistas y actores de las cadenas.

Este marco se complementó con herramientas de análisis económico-financiero aplicadas a iniciativas forestales, entre ellas **Green Value** (Humphries & Holmes, 2014, 2015), y con experiencias de investigación desarrolladas en Ecuador sobre cadenas de productos forestales madereros y no madereros, como el estudio de Panamá Mármol (2019). A partir de estos antecedentes se adaptaron los procedimientos al contexto de *J. neotropica*, considerando dos grupos principales de productos: **madereros**, especialmente madera destinada a talla, escultura, mobiliario y otros usos artesanales; y **no madereros**, particularmente frutos, nueces y productos derivados como las nogadas tradicionales.

La identificación y caracterización de los actores se profundizó mediante el estudio específico desarrollado en la provincia de Imbabura sobre las barreras socioecológicas y la cadena de valor de *J. neotropica* (Eraso et al., 2026). Esta investigación adoptó un **enfoque cualitativo fenomenológico**, orientado a comprender las experiencias y percepciones de los actores vinculados con el aprovechamiento, transformación y comercialización de productos derivados de la especie.

Los participantes fueron identificados progresivamente mediante **muestreo no probabilístico por bola de nieve**, a partir de informantes clave y de las referencias proporcionadas por los propios actores de la cadena. Se realizaron 21 entrevistas semiestructuradas entre marzo y septiembre de 2025, y el proceso de incorporación de participantes se mantuvo hasta alcanzar la **saturación teórica** (Eraso et al., 2026).

La información cualitativa obtenida fue procesada mediante **ATLAS.ti**, aplicando análisis temático y una estrategia combinada de codificación deductiva e inductiva. Este procedimiento permitió identificar y organizar categorías relacionadas con la disponibilidad del recurso, acceso al mercado, informalidad, gobernanza, distribución del valor, relaciones entre actores y sostenibilidad de la cadena (Eraso et al., 2026).

A partir de esta integración metodológica, las cadenas de valor de *J. neotropica* se analizaron considerando no solamente la secuencia de **producción, aprovechamiento, transformación, comercialización y consumo**, sino también la formación y distribución del valor económico, las relaciones entre actores, los principales cuellos de botella y las implicaciones de estas dinámicas para la conservación y el manejo sostenible de la especie.

14.2. Costos de producción de plántulas de *J. neotropica* en vivero

El costo de producción de plántulas forestales depende de la escala y tecnología del vivero, la cantidad y calidad de los insumos utilizados, la mano de obra requerida y la

eficiencia alcanzada durante las diferentes fases de producción. En términos económicos, la determinación del costo unitario requiere considerar tanto los costos variables asociados directamente con el volumen producido como los costos fijos correspondientes a infraestructura, equipos y otros componentes que deben distribuirse entre las unidades obtenidas.

En *J. neotropica*, estos costos están condicionados adicionalmente por características propias del proceso de propagación, entre ellas la procedencia y calidad de las semillas, los tratamientos pregerminativos, la composición del sustrato, los insumos empleados durante el crecimiento y el tiempo necesario para obtener plantas con características apropiadas para su establecimiento en campo. Por esta razón, el menor costo monetario por plántula no necesariamente representa la alternativa técnicamente más conveniente; el análisis debe considerar simultáneamente la cantidad de plantas obtenidas y su desempeño durante la fase de vivero.

La información disponible para Ecuador permite analizar esta relación a partir de investigaciones experimentales desarrolladas en Chimborazo y de registros obtenidos en el vivero Yuyucocha, Imbabura. Los estudios de Almeida (2020) y Guanolema (2022) proporcionan antecedentes sobre costos asociados con diferentes combinaciones de sustratos, bioinsumos y tratamientos pregerminativos, mientras que los registros generados desde 2021 en el marco del Programa de Investigación *Juglans* permiten examinar con mayor detalle la estructura de costos bajo condiciones experimentales de producción en Yuyucocha. Debido a las diferencias metodológicas y temporales entre estas fuentes, los valores se presentan como referencias correspondientes a las condiciones particulares de cada estudio y no como costos estandarizados de producción.

14.2.1. Costos de producción y su relación con el desempeño de las plántulas en vivero

El análisis de los costos de producción en vivero constituye un componente importante para evaluar conjuntamente la eficiencia económica y el desempeño técnico de la propagación de *J. neotropica*. El costo unitario de una plántula depende de los insumos utilizados, el tratamiento pregerminativo, la composición del sustrato y las labores requeridas durante el proceso de producción. Sin embargo, la alternativa de menor costo no necesariamente corresponde a aquella que presenta los mejores resultados de germinación y crecimiento; por ello, la interpretación económica debe realizarse conjuntamente con las variables morfológicas obtenidas en vivero.

Los estudios realizados por Almeida (2020) y Guanolema (2022) en la provincia de Chimborazo permiten examinar esta relación bajo condiciones experimentales distintas. Almeida (2020) evaluó el efecto de tratamientos pregerminativos y sustratos sobre la germinación y el crecimiento inicial de *J. neotropica*, incluyendo un sustrato base compuesto por turba (40 %), tierra negra de páramo (20 %), arena (20 %) y cascarilla de arroz (20 %), así como una variante de esta mezcla enriquecida con *Trichoderma* y citoquininas.

En el análisis económico comparativo, el sustrato base S1 presentó un costo de **USD 0,49 por plántula**, mientras que el sustrato enriquecido S2 alcanzó **USD 0,51 por**

plántula. Esta diferencia de apenas USD 0,02 por unidad estuvo acompañada por un aumento de la germinación promedio de 58,75 a 68,00 %, así como por mayores valores de altura, diámetro del cuello y longitud radicular en S2. En S1 se registraron 14,00 cm de altura, 5,10 mm de diámetro del cuello y 18,51 cm de longitud radicular; en S2 estos valores alcanzaron 18,24 cm, 5,30 mm y 23,48 cm, respectivamente (Almeida, 2020).

Guanolema (2022), por su parte, evaluó cinco métodos de escarificación combinados con dos sustratos para la producción de plantas de *J. neotropica* en el vivero Guaslán, Riobamba. Los tratamientos pregerminativos comprendieron ausencia de escarificación, escarificación mecánica, remojo en agua fría, ácido cítrico y agua caliente; los sustratos correspondieron a S1: arena de río 75 % + hojarasca 25 %, y S2: tierra negra 75 % + cascarilla 25 %.

Dentro de las combinaciones consideradas para la comparación económica, la escarificación mecánica asociada con S1 (M1S1) presentó un costo unitario de **USD 0,26 por plántula**, mientras que la combinación de la misma escarificación con S2 (M1S2) alcanzó **USD 0,28 por plántula**. M1S1 registró 41,80 % de germinación, 19,90 cm de altura, 5,60 mm de diámetro del cuello y 22,17 cm de longitud radicular; M1S2 presentó 28,80 % de germinación, 18,70 cm de altura, 4,30 mm de diámetro del cuello y 17,50 cm de longitud radicular (Guanolema, 2022).

La Tabla 14.1 sintetiza comparativamente los costos unitarios y las principales variables de germinación y crecimiento registradas en ambos estudios, permitiendo examinar la relación entre el costo de producción y el desempeño inicial de las plántulas.

Tabla 14.1

Costos unitarios y variables de germinación y crecimiento de plántulas de Juglans neotropica en dos estudios experimentales

Sustrato/tratamiento	Costo (USD/plántula)	Germinación (%)	Altura (cm)	Diámetro del cuello (mm)	Longitud radicular (cm)	Fuente
S1	0,49	58,75	14,00	5,10	18,51	Almeida (2020)
S2	0,51	68,00	18,24	5,30	23,48	Almeida (2020)
M1S1	0,26	41,80	19,90	5,60	22,17	Guanolema (2022)
M1S2	0,28	28,80	18,70	4,30	17,50	Guanolema (2022)

Nota. En Almeida (2020), S1 = turba 40 % + tierra negra de páramo 20 % + arena 20 % + cascarilla de arroz 20 %; S2 corresponde a la misma composición complementada con *Trichoderma* y citoquininas. En Guanolema (2022), M1 corresponde a escarificación mecánica mediante lijado del endocarpio; S1 = arena de río 75 % + hojarasca 25 %, y S2 = tierra negra 75 % + cascarilla 25 %. Los costos corresponden a los valores reportados en las investigaciones originales y no han sido actualizados a USD constantes de 2025. Elaboración propia con base en Almeida (2020) y Guanolema (2022).

La comparación evidencia que los costos unitarios observados en ambos estudios oscilaron entre **USD 0,26 y 0,51 por plántula**, pero estas diferencias no pueden atribuirse exclusivamente al costo de los insumos, debido a que las investigaciones utilizaron diseños experimentales, tratamientos y sustratos distintos. En Almeida (2020), el incremento de apenas USD 0,02 entre S1 y S2 estuvo asociado con mejores valores promedio de germinación, altura, diámetro del cuello y longitud radicular en el sustrato enriquecido. Por tanto, dentro de las condiciones de ese ensayo, el aumento marginal del costo estuvo acompañado por una respuesta favorable en varias variables de germinación y crecimiento evaluadas.

En Guanolema (2022), M1S1 mostró un costo ligeramente menor y mejores resultados que M1S2 en las variables incluidas en esta comparación. No obstante, estos resultados deben interpretarse dentro del conjunto completo de tratamientos estudiados y no como evidencia de que la alternativa de menor costo sea necesariamente la de mayor calidad para cualquier condición de vivero. Las investigaciones muestran respuestas diferenciadas de *J. neotropica* frente a los tratamientos pregerminativos y las características físicas y biológicas de los sustratos.

En consecuencia, desde una perspectiva económica aplicada al vivero, la decisión tecnológica debe considerar simultáneamente **el costo por plántula producida, el porcentaje de germinación y las características morfológicas del material vegetal obtenido**. Esta aproximación evita identificar automáticamente el menor costo unitario con la mayor eficiencia productiva y proporciona una base más apropiada para seleccionar material destinado posteriormente al establecimiento de plantaciones o sistemas agroforestales.

14.2.2. Estructura de costos de producción

El análisis de la estructura de costos permite identificar la participación de los diferentes componentes que intervienen en la producción y determinar cuáles tienen mayor incidencia sobre el costo unitario. En el vivero Yuyucocha, el levantamiento y análisis de costos de propagación de *J. neotropica* se ha realizado de manera recurrente desde 2021, en el marco del Programa de Investigación *Juglans*. La metodología aplicada considera los requerimientos de mano de obra e insumos físicos asociados con las diferentes actividades del proceso productivo, así como depreciación de equipos y herramientas, uso de la tierra, administración, imprevistos y costo financiero del capital. Los registros presentados corresponden a cuatro tratamientos pregerminativos evaluados a una escala de 60 plántulas por tratamiento.

Los costos unitarios obtenidos oscilaron entre **USD 0,24 y 0,29 por plántula** (Tabla 14.2). El menor valor correspondió a la ebullición a 100 °C durante 10 minutos, con USD 0,24 por planta. La exposición en estufa a 50 °C durante una hora seguida de inmersión en agua fría durante 24 horas alcanzó USD 0,27 por planta; el lijado con lija #5 durante cinco minutos, USD 0,28; y la exposición en estufa a 68 °C durante una hora y media presentó el mayor costo, con USD 0,29 por planta.

Tabla 14.2

Estructura de costos de producción de plántulas de Juglans neotropica según tratamiento pregerminativo en el vivero Yuyucocha

Tratamiento pregerminativo	Costos variables (USD)	Costos fijos y otros componentes (USD)	Costo total/60 plantas (USD)	Costo/planta (USD)
Ebullición a 100 °C durante 10 min	7,77	6,47	14,24	**0,24**
Lijado con lija #5 durante 5 min	9,64	7,08	16,72	**0,28**
Estufa a 68 °C durante 1,5 h	9,96	7,19	17,15	**0,29**
Estufa a 50 °C durante 1 h + agua fría durante 24 h	9,27	6,95	16,22	**0,27**

Nota. Valores obtenidos a una escala de 60 plántulas por tratamiento en el vivero Yuyucocha. El análisis de costos se ha realizado recurrentemente desde 2021 bajo una metodología común en el marco del Programa de Investigación *Juglans*. Los valores corresponden a las condiciones económicas observadas durante el período de evaluación. Elaboración con base en registros del Programa de Investigación *Juglans*.

La desagregación muestra una estructura relativamente semejante entre tratamientos. Los **costos variables representaron entre 54,6 y 58,1 % del costo total**, mientras que los costos fijos y otros componentes participaron entre 41,9 y 45,4 %. En la ebullición a 100 °C, los costos variables representaron 54,6 % y los demás componentes 45,4 %; en el lijado, 57,7 y 42,3 %, respectivamente; en la estufa a 68 °C, 58,1 y 41,9 %; y en la combinación de estufa a 50 °C más agua fría, 57,2 y 42,8 %. Esta relativa estabilidad refleja la presencia de una base común de costos derivada de las operaciones generales del vivero, sobre la cual se incorporan los requerimientos particulares de cada tratamiento.

El análisis de los componentes permite precisar las actividades de mayor incidencia. Dentro de los costos variables, los **riegos durante y después de la germinación** representaron en conjunto USD 5,00 por tratamiento, mientras que el sombreo alcanzó USD 2,00. Ambos corresponden a operaciones comunes del proceso productivo y explican una proporción importante del costo independientemente del tratamiento aplicado. Las fundas, la identificación de los tratamientos y las actividades de preparación y manejo del sustrato presentaron una participación menor.

Las diferencias entre tratamientos estuvieron asociadas principalmente con los requerimientos específicos de la técnica pregerminativa. La ebullición presentó un costo reducido asociado al tratamiento de las semillas; la exposición en estufa a 68 °C incorporó USD 2,25 por utilización del equipo; y la combinación de estufa a 50 °C con posterior inmersión en agua fría incorporó USD 1,50 por uso de la estufa y USD 0,05 por el tratamiento con agua. El lijado presentó una situación particular, debido a que requirió una mayor participación de mano de obra y el empleo de lijas, lo que contribuyó a incrementar su costo respecto de la ebullición.

Dentro de los costos fijos y otros componentes, la depreciación de equipos y herramientas y el uso de la tierra se mantuvieron en USD 2,00 y USD 1,00, respectivamente. La administración y los imprevistos se incorporaron porcentualmente a la estructura de costos, mientras que el interés asociado al capital variable presentó valores comprendidos aproximadamente entre USD 2,37 y 2,86. En consecuencia, la depreciación y el costo financiero del capital constituyeron componentes importantes de este grupo, mientras que administración e imprevistos tuvieron una participación comparativamente menor.

Los costos obtenidos en Yuyucocha se sitúan en un orden de magnitud comparable con algunos de los valores registrados en Chimborazo. Mientras los cuatro tratamientos evaluados en Yuyucocha presentaron costos de **USD 0,24–0,29 por plántula**, Guanolema (2022) reportó valores aproximados de **USD 0,26–0,31 por planta**. Almeida (2020), por su parte, registró costos superiores, de **USD 0,49–0,51 por plántula**, asociados con una estructura productiva que incorporó diferentes sustratos y bioinsumos. Como se analizó en el apartado anterior, estas diferencias no deben interpretarse como una comparación directa de eficiencia entre estudios, debido a que los tratamientos, insumos, escalas experimentales y criterios de asignación de costos fueron distintos. No obstante, los tres casos proporcionan referencias empíricas complementarias sobre la producción de *J. neotropica* bajo condiciones de vivero en la Sierra ecuatoriana.

Además, en Yuyucocha, el ejercicio de determinación de costos se ha repetido desde 2021 dentro de las actividades del Programa de Investigación *Juglans*, sin observarse modificaciones sustanciales en el orden de magnitud de los costos unitarios. Esta relativa estabilidad debe interpretarse dentro del contexto económico ecuatoriano, donde los valores se expresan directamente en dólares estadounidenses. Ello reduce la exposición a variaciones derivadas del tipo de cambio de una moneda nacional frente al dólar, aunque no elimina los cambios en los precios internos asociados con inflación, salarios, energía, transporte e insumos.

La **escala de producción** constituye otro factor que debe considerarse en la interpretación de estos resultados. Los valores obtenidos en Yuyucocha corresponden a una escala experimental y, por tanto, no deben considerarse invariantes frente al volumen de producción. Cuando aumenta el número de plantas dentro de la capacidad instalada de un vivero, determinados componentes relacionados con infraestructura, depreciación, uso de la tierra y otros recursos de soporte pueden distribuirse entre un mayor número de unidades, reduciendo su incidencia sobre el costo medio por planta. No se realizaron extrapolaciones cuantitativas a escalas comerciales, debido a que estas requerirían definir previamente la capacidad instalada, las necesidades adicionales de infraestructura y el comportamiento de los costos variables. Esta precaución evita atribuir al análisis una precisión económica no respaldada por los datos disponibles.

14.3. Costos de establecimiento y manejo de plantaciones de *J. neotropica*

Los costos de una plantación de *J. neotropica* comprenden diferentes etapas del ciclo silvicultural y no deben interpretarse como una única categoría de gasto. En términos económicos y operativos, es necesario distinguir los **costos de establecimiento**, correspondientes a la instalación de la plantación, de aquellos asociados posteriormente con su **mantenimiento y manejo silvicultural**.

El establecimiento concentra las inversiones requeridas para instalar la plantación, entre ellas la preparación del terreno, adquisición o producción del material vegetal, transporte, trazado, hoyado, plantación, replante y, cuando corresponde, fertilización y riego iniciales. Posteriormente, la plantación requiere actividades de mantenimiento, como limpias, coronamiento, control de malezas y fertilización de mantenimiento, así como intervenciones propiamente silviculturales —entre ellas podas y raleos— orientadas a conducir el crecimiento, estructura y calidad de los árboles.

La información económica disponible para *J. neotropica* en Ecuador procede de referencias técnicas y de investigaciones desarrolladas bajo diferentes condiciones de sitio, superficie, densidad y objetivos experimentales. Entre los antecedentes analizados se encuentran la referencia nacional de Ecuador Forestal (2010) y los estudios de Rosero (2011), Mediavilla (2023) y Ávila (2024). Debido a que estos trabajos no evalúan necesariamente las mismas operaciones ni períodos del ciclo de la plantación, sus resultados se analizan diferenciando los costos de establecimiento de aquellos correspondientes al mantenimiento y manejo posterior.

Para comparar los costos de establecimiento se utilizó como unidad principal el **dólar estadounidense por hectárea (USD/ha)**. Cuando las investigaciones se desarrollaron en superficies diferentes de una hectárea, los valores fueron normalizados proporcionalmente con fines comparativos. Esta transformación no supone que todos los componentes del costo varíen linealmente con la superficie, debido a que algunos rubros pueden presentar economías de escala.

14.3.1. Costos de establecimiento

Los antecedentes disponibles muestran diferencias importantes en los costos asociados con el establecimiento de *J. neotropica* en Ecuador. Estas variaciones responden no solamente a las condiciones particulares de cada sitio, sino también a los componentes incluidos en los presupuestos originales. Por esta razón, la comparación debe considerar conjuntamente el costo por hectárea y el alcance de las actividades contabilizadas en cada estudio (Tabla 14.3).

La referencia de **Ecuador Forestal** considera una plantación de 500 plantas/ha, con espaciamiento de 5 × 4 m. Para el primer año incorpora preparación del terreno, plantas, transporte, plantación, replante, mantenimiento y componentes administrativos y de asistencia técnica, alcanzando aproximadamente **USD 865/ha**. Aunque este presupuesto incluye labores posteriores a la plantación durante el primer año, constituye una referencia técnica nacional útil para dimensionar la inversión inicial requerida.

En Tunshi, Chimborazo, **Rosero (2011)** evaluó *J. neotropica* bajo diferentes niveles de fertilización, con un espaciamiento de 7 × 7 m. El presupuesto incluyó preparación del terreno, plantas, hoyado, plantación, riego, fertilización y labores culturales. El costo registrado para la superficie experimental, expresado proporcionalmente por hectárea, corresponde aproximadamente a **USD 1 147/ha**. En este caso, el valor incluye intervenciones de fertilización y labores culturales realizadas durante el período experimental, por lo que representa un costo más amplio que el establecimiento estrictamente entendido.

En Yuyucocha, Imbabura, **Mediavilla (2023)** determinó los costos correspondientes a una plantación experimental de *J. neotropica*. El presupuesto incorporó insumos, herramientas y operaciones de establecimiento, además de actividades de mantenimiento realizadas durante los primeros seis meses. El valor obtenido fue equivalente a aproximadamente **USD 1 837/ha**. Por tanto, este valor debe interpretarse como una referencia de inversión inicial que incluye un período definido de mantenimiento y no exclusivamente las operaciones efectuadas hasta el momento de plantación.

Tabla 14.3

Referencias documentales de inversión inicial asociada con el establecimiento y manejo temprano de plantaciones de Juglans neotropica en Ecuador

Fuente	Localidad / características	Alcance del costo reportado	Costo equivalente (USD/ha)
Ecuador Forestal	Referencia nacional; 500 plantas/ha; 5 × 4 m	Establecimiento + mantenimiento del primer año.	**865**
Rosero (2011)	Tunshi, Chimborazo; 7 × 7 m	Establecimiento + fertilización y labores culturales del período evaluado.	**1 147**
Mediavilla (2023)	Yuyucocha, Imbabura; plantación experimental	Establecimiento + mantenimiento durante seis meses.	**1 837**

Nota. Los costos fueron normalizados a USD/ha con fines comparativos. Los valores corresponden al año monetario de cada fuente y no fueron actualizados a USD constantes de 2025; por ello, la comparación tiene carácter documental y no representa una comparación real de costos a precios constantes.

Los valores presentados muestran referencias aproximadas entre USD 865 y 1 837/ha; sin embargo, este intervalo no representa exclusivamente diferencias en el costo técnico de plantar *J. neotropica*. Parte de la variación responde a que los estudios incorporaron distintos períodos y actividades posteriores al establecimiento. En consecuencia, los valores deben interpretarse como referencias económicas asociadas con la inversión inicial documentada en cada caso, y no como presupuestos estrictamente equivalentes.

También existen diferencias atribuibles a las condiciones de cada experiencia. En Rosero (2011), la fertilización y las labores culturales tuvieron una participación relevante en el presupuesto, mientras que Mediavilla (2023) incorporó actividades de mantenimiento durante los primeros seis meses. Estas diferencias de alcance limitan la comparación directa entre los valores documentados.

En consecuencia, no resulta metodológicamente apropiado obtener un costo nacional de establecimiento mediante el promedio aritmético de los casos analizados. Para el modelamiento financiero desarrollado posteriormente, el costo de establecimiento se definió a partir de un escenario silvicultural específico —densidad, preparación del terreno, costo de las plantas, transporte y plantación— utilizando los estudios analizados como referencias empíricas para sustentar los parámetros adoptados.

14.3.2. Costos de mantenimiento y manejo silvicultural

Una vez establecida la plantación, los costos se distribuyen a lo largo del ciclo productivo y responden a intervenciones destinadas tanto a mantener condiciones adecuadas para el crecimiento de los árboles como a conducir el rodal hacia los objetivos de producción. Desde una perspectiva silvicultural y económica, resulta conveniente diferenciar los **costos de mantenimiento** de los **costos de manejo silvicultural**, debido a que corresponden a actividades y momentos distintos del desarrollo de la plantación.

Los costos de mantenimiento comprenden labores recurrentes o periódicas como limpias, coronamiento, control de malezas, fertilización de mantenimiento y control fitosanitario. Su frecuencia e intensidad dependen de la edad de la plantación, las condiciones del sitio, la competencia de la vegetación acompañante y el estado nutricional y sanitario de los árboles. Parte de estas actividades se concentra durante los primeros años posteriores al establecimiento y disminuye progresivamente a medida que los árboles ocupan el sitio.

El manejo silvicultural comprende, en cambio, intervenciones orientadas a regular la densidad, seleccionar los individuos de mejores características y favorecer la formación de fustes de calidad. Entre estas operaciones destacan los **raleos y las podas**, cuya programación debe responder al desarrollo del rodal y al objetivo productivo. La poda desempeña un papel especialmente importante en plantaciones destinadas a madera, debido a que la eliminación oportuna de ramas favorece la producción posterior de madera con menor presencia de nudos.

Los criterios utilizados para estructurar el régimen de manejo de *J. neotropica* se apoyaron en antecedentes desarrollados para plantaciones forestales de la Sierra ecuatoriana. Galloway (1987), en *Criterios y estrategias para el manejo de plantaciones forestales en la Sierra ecuatoriana*, planteó para especies forestales un esquema de reducción progresiva de la densidad mediante raleos acompañado por podas sucesivas orientadas a mejorar la calidad de la madera. Estos principios fueron posteriormente incorporados y adaptados a especies del género *Alnus* en Ecuador (Añazco, 1996; Añazco et al., 2024).

En *Alnus nepalensis*, por ejemplo, se han formulado programas de manejo absoluto, intermedio y mínimo, diferenciados por el número e intensidad de las intervenciones. El programa absoluto contempla tres raleos sucesivos acompañados de podas, mientras que la selección de los árboles considera atributos como dominancia, rectitud del fuste y conformación. La poda se realiza de manera progresiva y vinculada con las intervenciones de raleo, procurando limitar el diámetro de las ramas intervenidas y favorecer la formación de madera limpia. Estos antecedentes constituyen **referentes metodológicos**, pero sus edades, densidades y costos no fueron transferidos directamente a *J. neotropica*.

Estimación de costos de poda y raleo en Yuyucocha

En el marco del **Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026)** se realizaron en el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte prácticas de mantenimiento, poda y raleo sobre árboles de *J. neotropica*. Durante estas actividades se

registraron los tiempos requeridos para ejecutar las operaciones y se determinaron rendimientos promedio de trabajo. Estos rendimientos fueron posteriormente valorados mediante el costo de la mano de obra correspondiente al período de realización de las actividades, permitiendo estimar los costos de las intervenciones silviculturales.

El número de árboles que se interviene en cada etapa no se derivó de los programas desarrollados para *Pinus* o *Alnus*, sino del **régimen de manejo propuesto específicamente para una plantación de *J. neotropica* orientada a producir madera de calidad**. Para el análisis se adoptó como escenario de referencia una densidad inicial de **500 árboles/ha**, sobre la cual se planteó una reducción progresiva hasta aproximadamente 100 árboles/ha destinados a permanecer hasta la corta final.

La Tabla 14.4 presenta el escenario técnico-económico propuesto para este régimen de manejo, integrando las principales actividades de mantenimiento y manejo silvicultural, su período referencial de ejecución, el número de árboles considerados en los raleos y los costos estimados por hectárea.

Tabla 14.4

Costos estimados de mantenimiento y manejo silvicultural de una plantación de Juglans neotropica destinada a la producción de madera de calidad

Actividad	Año o período referencial	Árboles a ralear (n.º/ha)	Costo estimado (USD/ha)
Limpieza en corona	1	—	45
Limpieza en corona	2	—	45
Primer raleo y poda de ramas bajas	3	150	80
Segundo raleo y poda hasta 2,5 m	8	150	80
Tercer raleo y poda hasta 4,5 m	12	100	60
Actividades de mantenimiento hasta la corta final	12–30/70	—	150
Depreciación de herramientas	Ciclo de manejo	—	50
Administración, asistencia técnica, supervisión y fiscalización	Ciclo de manejo	—	102
Total estimado			**612**

Nota. Escenario elaborado para una densidad inicial de 500 árboles/ha. Los costos de poda y raleo se estimaron a partir de tiempos y rendimientos de trabajo registrados con *J. neotropica* en Yuyucocha durante el Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), valorados con costos de mano de obra del período. El régimen de intervención se estructuró considerando principios de manejo progresivo mediante raleos y podas descritos por Galloway (1987), Añazco (1996) y Añazco et al. (2024), adaptados a *J. neotropica*. Los valores corresponden a un escenario técnico-económico de referencia y no constituyen una tarifa general para la especie.

El esquema concentra inicialmente los costos en actividades destinadas a reducir la competencia y posteriormente en intervenciones orientadas a mejorar la estructura y calidad del rodal. Después del primer raleo, la densidad teórica se reduce de 500 a aproximadamente 350 árboles/ha; con el segundo, a cerca de 200 árboles/ha; y después

del tercero permanecen alrededor de **100 árboles/ha**, seleccionados por sus mejores características para continuar hasta la cosecha final.

La programación por años presentada en la Tabla 14.4 debe interpretarse como **referencial y no como un calendario rígido**. La oportunidad efectiva de cada raleo o poda debe considerar el crecimiento y condición del rodal, particularmente la competencia entre copas, la calidad y rectitud de los fustes y el desarrollo de las ramas. Este principio coincide con los programas de manejo desarrollados para otras especies forestales en Ecuador, donde las intervenciones se vinculan prioritariamente con el estado de desarrollo de los árboles antes que con una edad cronológica fija. Para *A. nepalensis*, por ejemplo, las prescripciones de manejo utilizan la altura de los árboles dominantes como criterio para determinar los momentos de raleo.

El costo acumulado estimado para el escenario de mantenimiento y manejo silvicultural de *J. neotropica* asciende a **USD 612/ha**. Este valor debe interpretarse dentro de las condiciones en que fueron obtenidos los rendimientos de trabajo, debido a que el costo efectivo puede cambiar según densidad, tamaño de los árboles, topografía, accesibilidad, herramientas empleadas e intensidad de cada intervención. La experiencia económica documentada para *A. nepalensis* confirma precisamente la elevada participación de la mano de obra dentro de los costos de manejo silvicultural.

Costos de fertilización durante el mantenimiento

La fertilización constituye otro componente potencial del mantenimiento, aunque su aplicación debe responder al estado nutricional de los árboles y a las características del sitio y no considerarse necesariamente como una operación uniforme para todas las plantaciones. Ávila (2024) evaluó económicamente diferentes tratamientos NPK aplicados a árboles de *J. neotropica* previamente establecidos en la Estación Experimental Tunshi de la ESPOCH. El análisis se realizó mediante presupuestos parciales y consideró los costos variables de los fertilizantes, su transporte y la mano de obra requerida para la aplicación.

Entre los tratamientos fertilizados, los costos oscilaron entre **USD 0,84 y 2,25 por árbol**. El menor valor correspondió a la combinación de 300 g de nitrato de amonio + 300 g de cloruro de potasio, mientras que el mayor correspondió a la combinación de 300 g de nitrato de amonio + 400 g de superfosfato triple + 300 g de cloruro de potasio.

El análisis mostró que, dentro de las condiciones evaluadas, un mayor costo de fertilización no implicó necesariamente una mayor conveniencia económica. El análisis de dominancia identificó tratamientos en los cuales un aumento del costo no estuvo acompañado por un incremento suficiente del beneficio; entre las alternativas no dominadas, la combinación de 300 g de nitrato de amonio + 300 g de cloruro de potasio presentó una **tasa de retorno marginal de 18,30 %**. Por ello, la fertilización debe incorporarse al modelamiento como una intervención específica y sustentada en condiciones técnicas, y no como un costo anual generalizado para toda plantación.

Relación entre los costos de manejo y el valor de la madera

La inversión en manejo silvicultural adquiere sentido económico cuando se vincula con el objetivo de producir fustes de mayor calidad y, por tanto, con mejores posibilidades de valorización en el mercado. En el marco del Programa de Investigación *Juglans* se realizó durante 2025 un levantamiento de información comercial en depósitos de compra y venta de madera, carpinterías y talleres artesanales de Ibarra y San Antonio de Ibarra. Esta información fue posteriormente integrada en el análisis de la cadena de valor de *J. neotropica* en Imbabura, que incluyó actores vinculados con el aprovechamiento, transformación y comercialización de la madera (Eraso Terán et al., 2026).

Los registros de mercado obtenidos indicaron que la madera de *J. neotropica* puede alcanzar valores superiores a USD 200/m³, aunque el precio varía de acuerdo con dimensiones, calidad, presentación, disponibilidad y posición dentro de la cadena de comercialización. Este valor debe considerarse una referencia empírica de mercado obtenida en 2025 en Ibarra y San Antonio de Ibarra, y no un precio fijo aplicable a toda la madera producida.

En este contexto, los **USD 612/ha estimados para mantenimiento y manejo silvicultural no constituyen por sí solos evidencia de rentabilidad**, pero representan una inversión dirigida a mejorar la conformación de los árboles y la calidad potencial de la madera. Su conveniencia financiera deberá evaluarse posteriormente integrando estos egresos en el flujo de caja, junto con los ingresos provenientes de los raleos, la producción de nueces y la cosecha final de madera. De esta manera, el costo del manejo deja de analizarse como un gasto aislado y pasa a formar parte del modelo financiero del ciclo productivo de *J. neotropica*.

14.4. Evaluación financiera de madera y productos no madereros

La evaluación financiera de *J. neotropica* requiere considerar el carácter multiproducto de la especie y la diferente temporalidad de sus posibles ingresos. En una plantación orientada a la producción, la madera constituye un producto de largo plazo, mientras que las nueces representan un producto forestal no maderero (PFNM) capaz de generar ingresos periódicos una vez que los árboles alcanzan la fase reproductiva. A ello pueden sumarse ingresos intermedios derivados de los productos aprovechables obtenidos durante los raleos.

Esta característica permite analizar a *J. neotropica* mediante un modelo financiero que integra costos e ingresos distribuidos a lo largo del ciclo productivo. Los costos comprenden el establecimiento de la plantación y las intervenciones posteriores de mantenimiento y manejo silvicultural analizadas en el apartado 14.3; los ingresos, por su parte, pueden proceder de la producción periódica de nueces, de los productos obtenidos durante los raleos y de la madera correspondiente a la cosecha final.

La construcción del modelo se sustenta en una combinación de **información primaria del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), resultados de investigaciones sobre la especie presentados en otros capítulos del libro y parámetros explícitos del escenario financiero**. Esta diferenciación permite establecer

la procedencia de las variables utilizadas y evita considerar como datos observados aquellos valores que corresponden a decisiones propias del modelamiento.

Una parte de la información económica fue obtenida mediante levantamientos realizados por los investigadores del Programa *Juglans* en diferentes eslabones de las cadenas de valor de la madera y las nueces en Imbabura. En el caso de la madera, durante 2025 se recopiló información en depósitos de compra y venta, carpinterías, talleres de muebles y establecimientos artesanales de Ibarra y San Antonio de Ibarra. El levantamiento permitió obtener referencias sobre actores, costos, ingresos y precios de comercialización de la madera de *J. neotropica*. Parte de esta información fue posteriormente incorporada en el estudio de la cadena de valor de la especie en Imbabura (Eraso Terán et al., 2026).

Para las nueces, la información primaria procedió de tres contextos complementarios de la cadena. En **Pimampiro**, mediante informantes vinculados con una plantación de *J. neotropica*, actualmente integrada en un sistema agroforestal de nogal y café, se obtuvieron referencias sobre la edad de inicio de la fructificación, la productividad por árbol y los precios de venta en el sitio de producción. En **Cahuasquí** se documentaron las operaciones de recolección de frutos, extracción de las nueces, secado, limpieza, empaque y comercialización; estas actividades se encuentran además registradas fotográficamente en el capítulo 11. Finalmente, en puntos de comercialización ubicados en el entorno del **parque La Merced, en Ibarra**, se recopilaron precios de venta y referencias proporcionadas por actores con conocimiento de los diferentes eslabones de la cadena.

La información obtenida en estos sitios permite contrastar los valores observados desde la producción hasta el acondicionamiento y la comercialización. Sin embargo, los registros corresponden a condiciones locales y momentos específicos de observación; por tanto, los precios se utilizan como **referencias empíricas para construir los escenarios financieros** y no como precios únicos o constantes para Imbabura o Ecuador.

14.4.1. Parámetros y escenario de evaluación financiera

El escenario de evaluación integra la trayectoria silvicultural de una hectárea de *J. neotropica* con los flujos de costos e ingresos generados durante el horizonte de análisis. Se adopta una **densidad inicial de 500 árboles/ha**, correspondiente al mismo escenario utilizado para estimar los costos de mantenimiento y manejo silvicultural en el apartado 14.3.2. De esta manera, la estructura de costos, las intervenciones de raleo, el número de árboles remanentes y la producción potencial de nueces se analizan sobre una misma base silvicultural.

La densidad inicial, el régimen de raleos y el número de árboles remanentes determinan la evolución de la plantación y, por consiguiente, los flujos potenciales de madera y nueces. Para el escenario financiero se considera un horizonte de **50 años**, dentro del intervalo de turnos analizado para la especie. Este horizonte constituye un parámetro del escenario y no una predicción de que todas las plantaciones de *J. neotropica* deban cosecharse necesariamente a esa edad.

Para los productos no madereros se considera como referencia el **inicio de la producción de nueces alrededor de los 10 años** y una productividad de referencia de

500 nueces por árbol y año, valores obtenidos mediante informantes vinculados con el sistema nogal–café de Pimampiro. La producción anual del escenario varía posteriormente en función del número de árboles que permanece después de las sucesivas intervenciones silviculturales.

Para la madera se utiliza la productividad prevista para el escenario silvicultural y los precios de referencia obtenidos mediante el levantamiento de mercado realizado en 2025. Estos últimos se incorporan al modelo como valores de referencia y no como precios invariantes durante todo el horizonte de evaluación.

La evaluación adopta una **tasa de descuento anual del 12 %**, conforme al criterio financiero establecido en la metodología general de este capítulo. Los flujos se expresan en **dólares estadounidenses constantes del año base definido para la evaluación**, por lo que no se incorpora inflación nominal dentro de las proyecciones. Este procedimiento permite comparar costos e ingresos ocurridos en distintos momentos del horizonte mediante su correspondiente actualización financiera.

La Tabla 14.5 sintetiza los principales parámetros utilizados para estructurar el escenario de evaluación financiera, indicando los valores adoptados y la base técnica o empírica de cada uno.

Tabla 14.5
Parámetros del escenario de evaluación financiera de una plantación de Juglans neotropica

Parámetro	Valor utilizado	Base del parámetro
Superficie de referencia	1 ha	Unidad del escenario.
Densidad inicial	500 árboles/ha	Escenario silvicultural y base utilizada para la estimación de costos de manejo.
Horizonte de evaluación	50 años	Escenario financiero.
Costo de establecimiento	Según escenario seleccionado en 14.3.1	Estudios de caso en Ecuador.
Costos de mantenimiento y manejo silvicultural	Según calendario de intervenciones de 14.3.2	Programa de Investigación *Juglans.*
Productividad final en madera	100 m³/ha	Resultados productivos analizados en el libro.
Precio de referencia de la madera	USD 214/m³	Levantamiento de mercado, Programa *Juglans*, 2025.
Inicio de producción de nueces	Año 10	Informantes del sistema nogal–café de Pimampiro.
Producción media de nueces	500 nueces/árbol/año	Informantes del sistema nogal–café de Pimampiro.
Costos y precios de nueces	Según eslabón de la cadena	Registros en Pimampiro, Cahuasquí e Ibarra.
Tasa de descuento	12 % anual	Parámetro financiero establecido en 14.1.
Horizonte monetario	USD constantes	Año base definido en la metodología.

Nota. Los parámetros combinan información primaria del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026), resultados presentados en otros capítulos del libro y variables definidas para el escenario financiero. Los precios corresponden a referencias observadas en los mercados estudiados y se presentan redondeados para evitar una precisión artificial.

La Tabla 14.5 evidencia que no todos los componentes del modelo poseen la misma naturaleza. La edad inicial de fructificación, la productividad de nueces y los precios observados corresponden a referencias empíricas obtenidas en los sitios estudiados; el horizonte de 50 años y la tasa de descuento corresponden a parámetros explícitos del escenario financiero; mientras que la productividad final de madera y el régimen silvicultural se vinculan con los resultados técnicos desarrollados previamente en el libro. Esta diferenciación resulta fundamental para interpretar posteriormente los indicadores de rentabilidad.

Asimismo, los costos no se incorporan como un único desembolso inicial. El **costo de establecimiento** se registra al inicio de la inversión, mientras que las limpias, fertilizaciones, podas, raleos y demás intervenciones se asignan al año en que ocurren de acuerdo con el calendario silvicultural establecido en el apartado 14.3.2. Del mismo modo, los ingresos por nueces se incorporan anualmente a partir del inicio de la producción y se ajustan conforme disminuye el número de árboles productores después de los raleos.

Los productos obtenidos de los raleos se consideran separadamente de los costos de poda y raleo. Esta distinción evita la formulación utilizada en la versión preliminar del capítulo de "ingresos por raleos y podas": **la poda constituye un costo de manejo, mientras que un raleo puede generar simultáneamente un costo de intervención y un ingreso por los productos comercializables extraídos**. El valor de estos productos deberá corresponder a las dimensiones, calidad y destino comercial de los árboles removidos en cada intervención.

Finalmente, los parámetros de la Tabla 14.5 constituyen el **escenario base** de evaluación y no deben interpretarse como valores universales para *J. neotropica*. La productividad, los precios, los costos y el momento de las intervenciones pueden variar entre sitios y sistemas de producción. Por esta razón, los indicadores financieros obtenidos posteriormente —VAN, TIR y relación beneficio/costo— expresarán la rentabilidad del escenario evaluado bajo los supuestos y referencias empíricas establecidos, y no una rentabilidad garantizada para cualquier plantación de la especie.

14.4.2. Producción e ingresos por nueces

La producción de nueces constituye un componente relevante del flujo de ingresos en el escenario multiproducto de *J. neotropica*. A diferencia de la madera, cuyo principal retorno económico se concentra hacia el final del turno y eventualmente en los productos aprovechables obtenidos durante los raleos, las nueces pueden generar ingresos periódicos durante una parte importante del ciclo productivo. Su contribución financiera depende principalmente de la edad de entrada en producción comercial, la productividad por árbol, el número de individuos remanentes después de los raleos y el precio correspondiente al eslabón de comercialización considerado.

Los registros obtenidos en el marco del **Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026)** permiten diferenciar entre el inicio de la fructificación y el establecimiento de una producción regular con potencial comercial. Los primeros frutos pueden aparecer aproximadamente entre los **4 y 5 años** de edad; sin embargo, la producción adquiere mayor regularidad entre los **8 y 10 años**. Para evitar la sobreestimación de ingresos durante las primeras etapas reproductivas, el modelo financiero adopta de manera conservadora el **año 10 como inicio de la producción comercial de nueces**.

La productividad utilizada como referencia corresponde a aproximadamente **500 nueces por árbol y año**, valor obtenido mediante informantes vinculados con una plantación de *J. neotropica* de Pimampiro, actualmente integrada en un sistema agroforestal de nogal y café. Tanto la edad de entrada en producción comercial como la productividad deben interpretarse como referencias empíricas del sistema estudiado y no como parámetros productivos constantes o universales para la especie.

Dinámica de la producción de nueces

La producción potencial de nueces se relacionó con el régimen de manejo silvicultural establecido para el escenario financiero. La plantación parte de una densidad de **500 árboles/ha** y experimenta reducciones sucesivas mediante raleos hasta alcanzar una densidad final de 100 árboles/ha. De acuerdo con el esquema definido en el apartado 14.3.2, después del primer raleo permanecen aproximadamente 350 árboles/ha; después del segundo, 200 árboles/ha; y después del tercero, 100 árboles/ha.

Esta secuencia tiene una consecuencia directa para la evaluación de las nueces. Debido a que el segundo raleo se realiza antes del inicio de la producción comercial considerada en el modelo, cuando los árboles comienzan a generar ingresos por frutos en el **año 10**, la densidad remanente es de aproximadamente **200 árboles/ha**. Con el tercer raleo, previsto para el año 12, la densidad disminuye a **100 árboles/ha**, que permanecen hasta la cosecha final.

Al aplicar una productividad de referencia de 500 nueces por árbol y año, la producción potencial alcanza aproximadamente **100 000 nueces/ha/año durante los años 10 y 11** y **50 000 nueces/ha/año desde el año 12 hasta el final del horizonte de evaluación** (Tabla 14.6).

Tabla 14.6

Producción potencial de nueces durante la fase de producción comercial en el escenario de manejo de Juglans neotropica

Período	Árboles productores (n.^{0}/ha)	Productividad de referencia (nueces/árbol/año)	Producción potencial (nueces/ha/año)
Años 10-11	200	500	100 000
Años 12-50	100	500	50 000

Nota. Aunque la fructificación puede iniciarse aproximadamente entre los 4 y 5 años, el escenario financiero considera ingresos por nueces únicamente a partir del año 10, cuando la producción presenta mayor regularidad y potencial comercial. La productividad de 500 nueces/árbol/año corresponde a información obtenida mediante informantes vinculados con el sistema nogal–café de Pimampiro en el marco del Programa de Investigación *Juglans*. El número de árboles productores responde al régimen de raleos establecido para una densidad inicial de 500 árboles/ha. Los valores representan un escenario productivo de referencia y no rendimientos generalizables para todas las plantaciones de la especie.

La aplicación de este escenario durante el horizonte de evaluación determina una producción física acumulada de **200 000 nueces/ha durante los años 10–11** y **1 950 000 nueces/ha entre los años 12 y 50**. En conjunto, la producción potencial acumulada alcanza aproximadamente **2,15 millones de nueces/ha** entre los años 10 y 50. Esta cantidad representa producción física acumulada y no un ingreso financiero acumulado, debido a que los flujos correspondientes a cada año deben ser valorados y posteriormente actualizados mediante la tasa de descuento establecida para el modelo.

Valoración económica de las nueces

La valoración de la producción se sustentó en información primaria recopilada por el Programa de Investigación *Juglans* en diferentes eslabones de la cadena de valor en Imbabura. Esta diferenciación es particularmente importante porque el precio recibido en el sitio de producción no corresponde necesariamente al precio de una nuez acondicionada y comercializada al consumidor, y cada eslabón incorpora actividades, costos y márgenes diferentes.

En **Pimampiro** se obtuvieron referencias sobre el precio de venta en el sitio de producción, además de la información sobre edad de producción y productividad. En **Cahuasquí** se documentó un proceso de agregación de valor que comprende la recolección de los frutos, extracción de las nueces, secado, limpieza, empaque y posterior comercialización. Estas operaciones, documentadas también fotográficamente en el capítulo 11, permiten identificar actividades que agregan valor al producto, pero que al mismo tiempo generan costos adicionales antes de su venta.

Complementariamente, en puntos de comercialización ubicados en el entorno del **parque La Merced, en Ibarra**, se obtuvieron referencias sobre precios de venta y sobre el comportamiento de los diferentes eslabones de la cadena mediante informantes con experiencia en la comercialización de nueces. La combinación de estos tres contextos permitió disponer de referencias desde el sitio de producción hasta el acondicionamiento y la comercialización final.

Para la construcción del flujo financiero resulta necesario mantener separados estos eslabones. Cuando el escenario representa la **venta en el sitio de producción**, deben contabilizarse el precio recibido por el productor y únicamente los costos que este asume hasta ese momento. En cambio, cuando se evalúa un escenario en el cual el productor realiza también la extracción, secado, limpieza, empaque y comercialización, deben incorporarse tanto el mayor valor de venta obtenido como los costos adicionales requeridos para realizar dichas operaciones.

Por esta razón, los precios observados en Pimampiro, Cahuasquí e Ibarra se consideran **referencias empíricas de mercado** y no valores intercambiables entre sí. Tampoco se asume que representan precios únicos para Imbabura o para Ecuador, debido a que pueden variar según presentación del producto, volumen comercializado, época, canal de comercialización y participación de los diferentes actores de la cadena.

En consecuencia, la antigua estimación que establecía directamente un costo de **USD 10 por 500 nueces**, un precio de **USD 14 por 500 nueces** y, por diferencia, un ingreso neto de **USD 4**, no se incorpora automáticamente al escenario revisado. Su

utilización requiere que costo y precio correspondan al **mismo producto, grado de acondicionamiento y eslabón de la cadena**. Esta precaución evita atribuir al productor costos o márgenes generados por otros actores y permite construir posteriormente flujos financieros consistentes con cada alternativa de comercialización.

La producción de nueces presenta, por tanto, una ventaja financiera potencial frente a un esquema exclusivamente maderero: permite incorporar ingresos antes de la cosecha final. Sin embargo, la magnitud de esa contribución no debe establecerse mediante la simple suma nominal de la producción o de los ingresos anuales. En la evaluación integrada, cada flujo deberá asignarse al año en que ocurre y actualizarse a valor presente mediante la **tasa de descuento del 12 %**, conjuntamente con los costos de establecimiento, mantenimiento y manejo silvicultural y con los ingresos procedentes de los productos de los raleos y de la cosecha final de madera.

14.4.3. Producción e ingresos por madera

La madera constituye el componente de mayor horizonte temporal dentro de la evaluación financiera de *J. neotropica*. A diferencia de las nueces, que pueden generar ingresos periódicos a partir de la entrada en producción comercial, el principal retorno económico de la madera se concentra en la cosecha final y, eventualmente, en los productos aprovechables obtenidos durante los raleos. En consecuencia, la estimación de este ingreso requiere integrar el régimen de manejo silvicultural, el número de árboles remanentes, el crecimiento diamétrico, el volumen comercial individual y el precio de la madera.

El escenario financiero se articula con el régimen silvicultural definido en el apartado 14.3.2 para una densidad inicial de **500 árboles/ha**. El manejo contempla tres raleos sucesivos: el primero reduce la densidad de 500 a 350 árboles/ha; el segundo, de 350 a 200 árboles/ha; y el tercero, de 200 a **100 árboles/ha**, que permanecen hasta la cosecha final. Estas intervenciones tienen como propósito reducir progresivamente la competencia y concentrar el crecimiento en los individuos de mejor conformación, favoreciendo la formación de fustes destinados a la producción de madera de calidad.

Ingresos potenciales procedentes de los raleos

Desde el punto de vista financiero, los raleos constituyen intervenciones silviculturales que generan un costo de ejecución, pero que también pueden producir material aprovechable. Por esta razón, en el modelo se diferencian conceptualmente el **costo de efectuar el raleo** y el **posible ingreso derivado de los árboles extraídos**. La poda, en cambio, se considera una operación de manejo destinada principalmente a mejorar la calidad del fuste y, por tanto, se registra como costo y no como fuente directa de ingresos.

La secuencia adoptada para el escenario corresponde a una densidad inicial de 500 árboles/ha y tres intervenciones sucesivas hasta conservar 100 árboles/ha para la cosecha final (Tabla 14.7).

Tabla 14.7

Secuencia de raleos considerada en el escenario financiero de Juglans neotropica

Intervención	Año referencial	Árboles extraídos (n.º/ha)	Árboles remanentes (n.º/ha)
Densidad inicial	0	—	500
Primer raleo	3	150	350
Segundo raleo	8	150	200
Tercer raleo	12	100	100
Cosecha final	50	100	—

Nota. Los años corresponden al escenario adoptado para la evaluación financiera. En condiciones operativas, la oportunidad de los raleos debe responder principalmente al desarrollo y competencia del rodal y no exclusivamente a la edad cronológica.

No resulta apropiado valorar todos los árboles extraídos en los raleos utilizando el precio correspondiente a madera madura de alta calidad, debido a que las dimensiones y características de los individuos removidos, especialmente en las primeras intervenciones, pueden limitar su aprovechamiento comercial. Por ello, los ingresos procedentes de los raleos deben incorporarse únicamente cuando exista información que permita sustentar el volumen efectivamente aprovechable y su valor de mercado. Este criterio evita sobreestimar los beneficios del sistema.

Volumen comercial proyectado para la cosecha final

La estimación del volumen comercial al final del horizonte de evaluación se sustentó mediante evidencias complementarias de crecimiento y volumen de *J. neotropica*. En Yuyucocha se dispone de registros de cinco árboles cuya edad aproximada de **50 años** fue establecida mediante antecedentes proporcionados por antiguos trabajadores y docentes vinculados con el sitio. Estos individuos presentan DAP comprendidos aproximadamente entre **34 y 59 cm**, con un promedio cercano a **43 cm**, mientras que los volúmenes individuales estimados se encuentran aproximadamente entre **1,02 y 2,93 m³/árbol**, con un promedio próximo a **1,95 m³/árbol** (Programa de Investigación *Juglans*, 2021–2026).

Esta evidencia local es consistente con resultados obtenidos en el sur del Ecuador. En Saraguro, provincia de Loja, Reyes (2024) reportó para *J. neotropica* un incremento diamétrico medio de **8,34 mm/año**. Utilizado únicamente como referencia de crecimiento de largo plazo, este valor equivaldría mediante una proyección lineal a aproximadamente **41,7 cm en 50 años**. Esta equivalencia no supone que el crecimiento diamétrico permanezca constante durante toda la vida del árbol, sino que proporciona una referencia independiente compatible con los diámetros registrados en los árboles de edad aproximada conocida de Yuyucocha (Reyes, 2024).

Complementariamente, el modelo de relación entre DAP y volumen comercial desarrollado para *J. neotropica* a partir de **1 582 observaciones** mostró una asociación positiva entre ambas variables ($R^2 = 0,643$; R^2 ajustado = 0,643; RMSE = 0,521 m³/árbol).

La curva ajustada indica que árboles con DAP próximos a **40 cm** alcanzan aproximadamente **1 m³ de volumen comercial individual**. Esta relación permite vincular las evidencias de crecimiento diamétrico con la estimación del volumen utilizado en la evaluación financiera.

La convergencia entre los diámetros observados en Yuyucocha, el incremento diamétrico registrado en Saraguro y la relación DAP–volumen proporciona sustento para adoptar, con fines de modelamiento, un volumen comercial conservador de **1,0 m³/árbol** al final del horizonte de 50 años. Considerando los 100 individuos seleccionados que permanecen después del último raleo, el volumen comercial proyectado para la cosecha final corresponde a:

100 árboles/ha × 1,0 m³/árbol = 100 m³/ha.

Este valor debe interpretarse como un **volumen comercial proyectado para el escenario financiero** y no como el rendimiento observado directamente en una plantación de una hectárea. La adopción de 1,0 m³/árbol constituye además un supuesto prudente, dado que el promedio estimado en los cinco árboles de aproximadamente 50 años evaluados en Yuyucocha fue superior a este valor.

Valoración económica de la madera

La referencia de precio utilizada para valorar la madera procede de información primaria recopilada en **2025**, en el marco del Programa de Investigación *Juglans*, mediante levantamientos realizados en depósitos de compra y venta de madera, carpinterías y talleres artesanales de Ibarra y San Antonio de Ibarra. Estas actividades formaron parte del análisis de la cadena de valor de *J. neotropica* desarrollado en Imbabura, cuyos resultados fueron incorporados parcialmente en el estudio de Eraso Terán et al. (2026).

A partir de estos registros se adoptó para el escenario financiero un precio de referencia redondeado de **USD 214/m³**. Este valor corresponde a las condiciones de mercado identificadas durante el levantamiento y no debe interpretarse como un precio único o permanente para la madera de *J. neotropica* en Ecuador. El valor efectivo puede variar según dimensiones y calidad del fuste, grado de transformación, volumen comercializado, ubicación geográfica y eslabón de la cadena en el cual se realiza la transacción.

La combinación del volumen comercial proyectado y el precio de referencia determina un ingreso bruto potencial en la cosecha final de:**100 m³/ha × USD 214/m³ = USD 21 400/ha.** Los parámetros empleados para esta estimación se sintetizan en la Tabla 14.8.

Tabla 14.8

Parámetros utilizados para la estimación del ingreso por madera en la cosecha final de Juglans neotropica

Parámetro	Valor de referencia
Horizonte de evaluación	50 años
Densidad inicial	500 árboles/ha
Árboles remanentes para cosecha final	100 árboles/ha
DAP observado en árboles de ≈50 años, Yuyucocha	≈34–59 cm
DAP promedio observado, Yuyucocha	≈43 cm
Volumen individual observado, Yuyucocha	≈1,02–2,93 m^3/árbol
Volumen individual promedio, Yuyucocha	≈1,95 m^3/árbol
Incremento diamétrico medio, Saraguro	8,34 mm/año
Equivalencia lineal referencial a 50 años	≈41,7 cm
Volumen adoptado para el escenario	**1,0 m^3/árbol**
Volumen comercial proyectado	**100 m^3/ha**
Precio de referencia de la madera	**USD 214/m^3**
Ingreso bruto proyectado en el año 50	**USD 21 400/ha**

Nota. Los datos de Yuyucocha corresponden a registros del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). El incremento diamétrico de Saraguro corresponde a Reyes (2024); su equivalencia a 50 años se presenta únicamente como referencia lineal y no como predicción de crecimiento constante. El volumen de 1,0 m^3/árbol constituye un valor conservador adoptado para el escenario financiero a partir de la evidencia dasométrica disponible. El precio de la madera corresponde a referencias de mercado levantadas en 2025 en Ibarra y San Antonio de Ibarra en el marco del Programa de Investigación *Juglans* y del estudio de cadena de valor de la especie (Eraso Terán et al., 2026). Los valores monetarios se expresan en dólares estadounidenses.

Incidencia del horizonte temporal sobre el ingreso por madera

El ingreso bruto de **USD 21 400/ha** corresponde al valor nominal proyectado para el año de la cosecha y, por sí solo, no constituye un indicador de rentabilidad. Debido a que este flujo se produce al final de un horizonte de 50 años, su contribución a la viabilidad financiera debe determinarse mediante su actualización a valor presente utilizando la tasa de descuento establecida para el modelo.

Esta característica diferencia sustancialmente el componente maderero del ingreso generado por las nueces. Mientras la madera concentra el principal retorno al final del horizonte, las nueces permiten generar flujos periódicos desde la entrada en producción comercial. Por ello, la evaluación de la viabilidad económica de *J. neotropica* requiere integrar temporalmente ambos productos con los costos de establecimiento, mantenimiento y manejo silvicultural, evitando interpretar de manera aislada los ingresos nominales de la cosecha final.

14.4.4. Evaluación financiera integrada de madera y nueces

La evaluación financiera integrada considera conjuntamente los costos de establecimiento y manejo silvicultural y los ingresos procedentes de la producción de nueces y de la cosecha final de madera. El escenario corresponde a una plantación de **500 árboles/ha**, manejada mediante tres raleos sucesivos hasta conservar 100 árboles/ha, con un horizonte de **50 años** y una tasa de descuento anual del **12 %**.

Para mantener consistencia entre las diferentes etapas del modelo, el costo inicial de establecimiento se estimó específicamente para el escenario de 500 árboles/ha tomando como referencia la estructura de costos de Ecuador Forestal. Se excluyeron del desembolso inicial las labores culturales posteriores al establecimiento, debido a que estas se contabilizan separadamente dentro del calendario de mantenimiento y manejo silvicultural. Con este criterio, el costo de establecimiento utilizado en el flujo financiero es de aproximadamente **USD 680/ha**.

Los costos de mantenimiento y manejo corresponden al escenario desarrollado en el apartado 14.3.2, cuyo valor acumulado es de **USD 612/ha**. Para la evaluación financiera estos costos no se registraron como un único desembolso, sino en los años referenciales en que ocurren las intervenciones. La distribución temporal utilizada fue de USD 60/ha en los años 1 y 2; USD 102/ha en el año 3; USD 102/ha en el año 8; USD 78/ha en el año 12; y USD 210/ha en el período posterior, representado conservadoramente en el año 30. Estos valores incorporan proporcionalmente la depreciación de herramientas y los costos administrativos previstos en la estructura de manejo. El esquema original de manejo suma USD 612/ha e incluye coronamientos, tres intervenciones de raleo y poda, mantenimiento posterior, depreciación y administración.

Flujo de ingresos

Los ingresos por nueces se incorporan únicamente desde el inicio de la producción comercial adoptado para el modelo. Durante los años 10 y 11 permanecen 200 árboles productores/ha; con una productividad de referencia de 500 frutos/árbol/año y un precio al productor de **USD 14 por cada 500 frutos**, el ingreso bruto asciende a **USD 2 800/ha/año**. A partir del año 12 permanecen 100 árboles/ha, generando un ingreso bruto de **USD 1 400/ha/año** hasta el año 50.

La madera constituye el ingreso final del escenario. Como se estableció en el apartado 14.4.3, se proyecta conservadoramente un volumen comercial de **100 m³/ha**, correspondiente a 100 árboles con aproximadamente 1 m³/árbol. Utilizando un precio de referencia de **USD 214/m³**, el ingreso bruto proyectado para el año 50 alcanza **USD 21 400/ha**.

No se incorporaron ingresos procedentes de los tres raleos en el escenario base. Aunque los árboles extraídos pueden generar productos aprovechables, no se dispone todavía de información suficientemente desagregada sobre volumen y precio según la edad de cada intervención. Su exclusión constituye, por tanto, un criterio conservador del modelo.

La Tabla 14.9 sintetiza la distribución temporal de los principales costos e ingresos considerados en la evaluación financiera integrada, desde el establecimiento de la plantación hasta la cosecha final de madera en el año 50.

Tabla 14.9

Flujos principales utilizados en la evaluación financiera integrada de una plantación de Juglans neotropica

Año/período	Concepto	Costo (USD/ha)	Ingreso (USD/ha)
0	Establecimiento	680	—
1	Mantenimiento y costos asociados	60	—
2	Mantenimiento y costos asociados	60	—
3	Primer raleo y poda	102	—
8	Segundo raleo y poda	102	—
10–11	Producción comercial de nueces	—	2 800/año
12	Tercer raleo, poda y producción de nueces	78	1 400
13–29	Producción de nueces	—	1 400/año
30	Mantenimiento acumulado del período + nueces	210	1 400
31–49	Producción de nueces	—	1 400/año
50	Nueces + cosecha final de madera	—	**22 800**

Nota. Los costos e ingresos corresponden al escenario financiero descrito en el texto y se expresan en USD/ha. El ingreso del año 50 incluye USD 1 400 por nueces y USD 21 400 por madera. No se atribuyeron ingresos a los raleos. Los precios de nueces y madera corresponden a referencias obtenidas por el Programa de Investigación *Juglans* y se mantienen constantes en términos reales dentro del escenario.

Indicadores de rentabilidad financiera

Los flujos fueron actualizados mediante una tasa del **12 % anual**, calculando el valor presente de cada costo e ingreso:

La actualización genera un valor presente aproximado de los beneficios de **USD 5 094/ha** y un valor presente de los costos de **USD 922/ha**. La diferencia entre ambos determina un **Valor Actual Neto (VAN) de aproximadamente USD 4 172/ha**. La **Tasa Interna de Retorno (TIR)** del escenario se aproxima al **27,0 %**, mientras que la relación entre beneficios y costos actualizados alcanza aproximadamente 5,52.

La Tabla 14.10 sintetiza los principales indicadores de rentabilidad obtenidos para el escenario integrado de producción de madera y nueces, considerando la tasa de descuento y los valores presentes de los beneficios y costos estimados.

Tabla 14.10

Indicadores financieros del escenario integrado de producción de madera y nueces de Juglans neotropica

Indicador	Resultado
Tasa de descuento	12 %
Valor presente de beneficios	≈ USD 5 094/ha
Valor presente de costos	≈ USD 922/ha
VAN	**≈ USD 4 172/ha**
TIR	**≈ 27,0 %**
Relación B/C	**≈ 5,52**

Nota. Resultados de simulación financiera elaborados a partir de los parámetros técnicos y económicos establecidos en los apartados 14.2–14.4. Los resultados corresponden exclusivamente al escenario base y no representan una rentabilidad garantizada para plantaciones de *J. neotropica*.

Los tres indicadores muestran que, **bajo los parámetros del escenario evaluado**, la combinación de madera y nueces presenta viabilidad financiera: el VAN es positivo a una tasa de descuento del 12 %, la TIR supera dicha tasa y la relación B/C es superior a uno. Sin embargo, la interpretación de estos resultados requiere considerar la composición temporal de los beneficios.

En particular, la contribución de la madera a valor presente es limitada por su ocurrencia en el año 50. A una tasa de descuento relativamente elevada como 12 %, los ingresos recibidos al final de un turno prolongado pierden una parte considerable de su peso financiero. En contraste, las nueces comienzan a generar flujos desde el año 10 y se mantienen durante el resto del horizonte, por lo que adquieren una importancia proporcionalmente mayor dentro del valor actualizado del sistema.

Este resultado pone de manifiesto una característica financiera relevante de *J. neotropica*: la viabilidad del escenario no depende exclusivamente del elevado valor nominal de la madera, sino de la complementariedad temporal entre un producto forestal no maderero de ingreso periódico y un producto maderero de largo plazo. El carácter multiproducto contribuye así a reducir el efecto financiero asociado con la prolongada espera hasta la cosecha final.

No obstante, estos resultados deben interpretarse con cautela. El modelo mantiene constantes en términos reales los precios y la productividad, no incorpora ingresos por los productos de los raleos y tampoco incorpora costos de cosecha de frutos que no hayan sido documentados para el escenario de venta al productor. Por ello, los indicadores representan una **simulación financiera basada en evidencia empírica y supuestos explícitos**, cuya sensibilidad frente a cambios en precios, productividad, costos y tasa de descuento deberá examinarse posteriormente.

14.4.5. Análisis de sensibilidad

Los indicadores financieros obtenidos para una plantación de *J. neotropica* dependen de parámetros productivos, comerciales y financieros que pueden variar durante un horizonte de evaluación de 50 años. Por esta razón, los resultados del escenario base no deben interpretarse como valores invariantes. El análisis de sensibilidad permite examinar la respuesta del VAN, la TIR y la relación beneficio/costo frente a cambios razonables en las principales variables del modelo.

El escenario base considera una densidad inicial de 500 árboles/ha, producción comercial de nueces desde el año 10, productividad de referencia de 500 frutos/árbol/año, precio al productor de USD 14 por cada 500 frutos, volumen comercial final de 100 m³/ha, precio de la madera de USD 214/m³ y tasa de descuento del 12 %. Bajo estas condiciones se obtuvo un VAN aproximado de **USD 4 172/ha**, una TIR de **27,0 %** y una relación B/C de **5,52**.

Con el propósito de evaluar la estabilidad de los resultados financieros frente a cambios en los principales parámetros del modelo, se realizó un análisis de sensibilidad mediante variaciones individuales de ±20 % respecto del escenario base. La Tabla 14.11 presenta los efectos de estas variaciones sobre el VAN, la TIR y la relación beneficio/costo (B/C).

Tabla 14.11

Sensibilidad de los indicadores financieros de la plantación de Juglans neotropica ante variaciones de los principales parámetros

Variable modificada	Escenario	VAN (USD/ha)	TIR (%)	B/C
Escenario base	—	**4 172**	**27,0**	**5,52**
Precio de nueces	−20 %	3 168	24,7	4,43
Precio de nueces	+20 %	5 176	28,9	6,61
Productividad de nueces	−20 %	3 168	24,7	4,43
Productividad de nueces	+20 %	5 176	28,9	6,61
Precio de madera	−20 %	4 157	27,0	5,51
Precio de madera	+20 %	4 187	27,0	5,54
Costos totales	−20 %	4 356	29,3	6,90
Costos totales	+20 %	3 987	25,1	4,60

Nota. Las variaciones se aplicaron de forma individual respecto del escenario base, manteniendo constantes los demás parámetros. Los resultados corresponden a una simulación financiera y se presentan redondeados.

Los resultados muestran que el modelo es especialmente sensible a las variables relacionadas con la **producción de nueces**. Una reducción de 20 % en el precio al productor disminuye el VAN desde aproximadamente USD 4 172 hasta USD 3 168/ha y la TIR desde 27,0 hasta 24,7 %. Una variación equivalente en la productividad produce el mismo efecto matemático, debido a que ambas variables actúan directamente sobre el ingreso anual generado por los frutos.

El efecto del precio de la madera es, en cambio, considerablemente menor. Incluso una variación de ±20 % alrededor del precio de referencia de USD 214/m³ modifica muy poco el VAN y prácticamente no altera la TIR. Esta baja sensibilidad no implica que la madera carezca de importancia económica, sino que su principal ingreso ocurre en el **año 50** y, por tanto, su valor presente se reduce sustancialmente al aplicarse una tasa de descuento del 12 %.

Los costos muestran una influencia intermedia. Un incremento de 20 % en los costos reduce el VAN a aproximadamente USD 3 987/ha y la relación B/C a 4,60, mientras que una reducción de 20 % incrementa el VAN hasta aproximadamente USD 4 356/ha. En ambos casos el escenario continúa presentando VAN positivo, TIR superior al 12 % y B/C mayor que uno.

Sensibilidad a la tasa de descuento

La tasa de descuento tiene una incidencia relevante debido al largo horizonte de la inversión forestal. Al elevarla, los ingresos futuros —especialmente la cosecha final de madera— pierden progresivamente importancia en términos de valor presente. La Tabla 14.12 presenta la sensibilidad del VAN y de la relación beneficio/costo (B/C) ante tasas de descuento del 10, 12 y 14 %.

Tabla 14.12

Sensibilidad financiera frente a diferentes tasas de descuento

Tasa de descuento	VAN (USD/ha)	B/C
10 %	**6 086**	**7,44**
12 %	**4 172**	**5,52**
14 %	**2 897**	**4,21**

Nota. La TIR no cambia al modificar la tasa utilizada para calcular el VAN, debido a que constituye una propiedad del flujo financiero y no de la tasa de descuento seleccionada para la evaluación.

Aun con una tasa de descuento de **14 %**, el VAN permanece positivo y la relación B/C se mantiene superior a uno. No obstante, la disminución del VAN entre 10 y 14 % es considerable, lo que muestra la importancia de la tasa de descuento en inversiones forestales de largo plazo.

Sensibilidad al inicio de la producción comercial de nueces

La edad de entrada en producción comercial constituye otra variable particularmente relevante. Los registros utilizados en el modelo indican que los primeros frutos pueden aparecer entre los 4 y 5 años y que la producción se estabiliza aproximadamente entre los 8 y 10 años. El escenario base adopta conservadoramente el año 10. Para examinar el efecto de este supuesto, la Tabla 14.13 compara los indicadores financieros resultantes de tres alternativas de inicio de la producción comercial: años 8, 10 y 12.

Tabla 14.13

Efecto del año de inicio de la producción comercial de nueces sobre los indicadores financieros

Inicio de producción comercial	VAN (USD/ha)	TIR (%)	B/C
Año 8	6 312	35,4	7,84
Año 10 – escenario base	4 172	27,0	5,52
Año 12	2 465	20,7	3,67

Nota. Los escenarios modifican únicamente el año de inicio de la producción comercial de nueces, manteniendo constantes los demás parámetros del modelo financiero. VAN = valor actual neto; TIR = tasa interna de retorno; B/C = relación beneficio/costo.

La anticipación de la producción comercial al año 8 incrementa sustancialmente la rentabilidad, debido a que incorpora ingresos en años con menor efecto del descuento. Por el contrario, un retraso hasta el año 12 reduce el VAN y la TIR, aunque el escenario continúa siendo financieramente positivo bajo los demás parámetros considerados. Este resultado confirma que **la precocidad y regularidad de la producción de nueces constituyen factores financieros más determinantes que pequeñas variaciones en el precio final de la madera**.

En conjunto, el análisis muestra que el escenario integrado conserva indicadores financieros positivos ante las variaciones individuales evaluadas. Sin embargo, la rentabilidad presenta mayor sensibilidad al **precio, productividad y momento de entrada en producción de las nueces**, mientras que el precio de la madera tiene un efecto reducido sobre el valor presente debido a la larga espera hasta la cosecha final. Esta característica refuerza la importancia del carácter multiproducto de *J. neotropica*: los flujos periódicos derivados de los PFNM desempeñan un papel central en la viabilidad financiera de una inversión cuyo componente maderero madura a largo plazo.

Los resultados deben interpretarse dentro de los límites del escenario modelado. No incorporan todavía variaciones simultáneas de múltiples parámetros, eventos extremos, mortalidad adicional, cambios estructurales en el mercado ni ingresos potenciales procedentes de los productos obtenidos en los raleos. En consecuencia, el análisis de sensibilidad no pretende predecir un resultado financiero futuro, sino establecer la robustez relativa del escenario y reconocer las variables que concentran el mayor riesgo económico.

14.4.6. Discusión e implicaciones financieras

Los resultados del escenario integrado muestran que la evaluación financiera de *J. neotropica* no puede sustentarse únicamente en el valor de la madera obtenida al final del turno. Aunque la especie produce una madera de alto valor comercial, el prolongado horizonte requerido para alcanzar dimensiones adecuadas reduce considerablemente el peso financiero de ese ingreso cuando se actualiza mediante una tasa de descuento del 12 %. En estas condiciones, los ingresos periódicos procedentes de las nueces adquieren una importancia considerable en los indicadores financieros del escenario evaluado.

Esta característica constituye una de las principales diferencias entre un modelo exclusivamente maderero y un esquema multiproducto. En el escenario evaluado, las nueces comienzan a generar ingresos comerciales desde el año 10 y continúan durante el resto del horizonte de análisis. Su recurrencia permite incorporar flujos en períodos considerablemente anteriores a la cosecha final de madera, reduciendo parcialmente el efecto financiero asociado con la larga rotación de la especie.

El análisis de sensibilidad es consistente con esta interpretación. Las variables que ejercen mayor influencia sobre los indicadores financieros son el **precio de las nueces, la productividad por árbol y la edad de entrada en producción comercial**, mientras que variaciones equivalentes en el precio final de la madera generan efectos comparativamente menores sobre el VAN. Este comportamiento no implica que la madera tenga una importancia económica secundaria en términos nominales; refleja, principalmente, el efecto de la actualización financiera sobre un ingreso concentrado en el año 50.

La edad de entrada en producción comercial merece especial atención. Aunque los primeros frutos pueden aparecer aproximadamente entre los 4 y 5 años, el escenario base considera de manera conservadora ingresos únicamente desde el año 10, cuando la producción adquiere mayor regularidad. Esta decisión reduce el riesgo de sobreestimación y evidencia que la selección de material vegetal con buena respuesta productiva y el manejo adecuado del sistema durante sus primeras etapas pueden tener implicaciones financieras de largo alcance.

La productividad de las nueces constituye igualmente una variable crítica. El rendimiento de 500 frutos por árbol y año utilizado en el escenario procede de información obtenida en Pimampiro y representa una referencia empírica del sistema estudiado. Su importancia dentro del modelo indica la necesidad de ampliar en el futuro el seguimiento de la producción de frutos en árboles de diferentes edades, procedencias y condiciones de manejo, con el propósito de construir curvas de producción que permitan sustituir progresivamente los valores promedio por funciones productivas más detalladas.

Desde la perspectiva maderera, el escenario utiliza un volumen comercial conservador de **1 m³ por árbol** para los 100 individuos remanentes al final del turno. Esta estimación se encuentra respaldada por los registros de árboles de aproximadamente 50 años en Yuyucocha, por la relación DAP–volumen desarrollada para la especie y por referencias independientes de crecimiento diamétrico en Saraguro. La utilización de un valor inferior al promedio observado en los árboles de Yuyucocha reduce el riesgo de sobreestimar la producción final.

El régimen de manejo constituye otro componente fundamental del resultado financiero. Los raleos y podas generan costos en momentos determinados del ciclo, pero están orientados a concentrar el crecimiento en los individuos seleccionados y mejorar la calidad de la madera. En el escenario base no se asignaron ingresos a los productos obtenidos durante los raleos, debido a que no se dispone de información suficientemente precisa sobre sus volúmenes y precios según la edad de intervención. En consecuencia, la eventual comercialización de estos productos representaría un ingreso adicional no incorporado en la evaluación.

La separación entre **precio al productor de las nueces y precios correspondientes a etapas posteriores de acondicionamiento y comercialización** constituye también una consideración metodológica relevante. La información recopilada en Pimampiro, Cahuasquí e Ibarra evidencia que la agregación de valor modifica tanto los ingresos como los costos. Por ello, el escenario base utiliza un precio correspondiente al nivel del productor y evita atribuir a la plantación márgenes que dependen de actividades posteriores como extracción, secado, limpieza, empaque y comercialización.

En términos generales, los resultados indican que la viabilidad financiera de *J. neotropica* puede fortalecerse cuando la especie se maneja bajo una **estrategia multiproducto**, en la cual la producción periódica de nueces complementa el ingreso de largo plazo asociado con la madera. Esta complementariedad resulta particularmente relevante para pequeños y medianos productores, para quienes un sistema exclusivamente maderero puede implicar períodos excesivamente prolongados sin generación de ingresos.

Sin embargo, los indicadores obtenidos corresponden a una **simulación basada en un escenario específico** y no deben interpretarse como resultados garantizados. La rentabilidad efectiva dependerá de las condiciones del sitio, supervivencia y crecimiento de los árboles, productividad de frutos, intensidad del manejo, costos reales de las intervenciones, comportamiento de los mercados y condiciones de financiamiento. Por esta razón, el VAN, la TIR y la relación B/C deben utilizarse principalmente como herramientas para comparar alternativas y orientar decisiones, más que como predicciones exactas del desempeño económico futuro.

Finalmente, el análisis financiero desarrollado en este apartado considera exclusivamente **flujos monetarios privados** asociados con costos e ingresos de producción. No incorpora beneficios ambientales, sociales o territoriales generados por la plantación, tales como captura de carbono, regulación hídrica, conservación de biodiversidad, restauración de suelos, valor cultural o generación de servicios ecosistémicos. La incorporación de estos componentes requiere un enfoque de **evaluación económica**, distinto de la evaluación financiera, y se aborda en el apartado siguiente.

14.5. Evaluación económica y beneficios ampliados de *J. neotropica*

La evaluación financiera desarrollada en el apartado anterior analiza la inversión desde la perspectiva del productor, considerando los costos monetarios de establecimiento, mantenimiento y manejo silvicultural y los ingresos derivados de la comercialización de nueces y madera. Sin embargo, este enfoque no representa la totalidad de los beneficios generados por una plantación de *J. neotropica*, particularmente cuando la especie se establece con propósitos múltiples de producción, restauración o integración en sistemas agroforestales.

Desde una perspectiva económica más amplia, las plantaciones forestales pueden generar beneficios que no necesariamente se reflejan en los precios de mercado recibidos por el propietario. Entre ellos se encuentran el almacenamiento de carbono, la protección del suelo, la regulación hídrica, la generación de hábitat, la conservación de biodiversidad, la conectividad del paisaje y otros servicios ecosistémicos. Su

incorporación permite distinguir entre la **rentabilidad financiera privada** y el **valor económico que la intervención puede generar para la sociedad y el territorio**.

Esta diferenciación resulta particularmente pertinente para *J. neotropica*, debido a su condición de especie forestal nativa de los Andes y a la diversidad de funciones documentadas en los capítulos precedentes de esta obra. La especie puede formar parte de plantaciones forestales, sistemas agroforestales, procesos de restauración y espacios arbolados, generando simultáneamente productos comercializables y funciones ecológicas. Por ello, limitar su evaluación exclusivamente a los flujos monetarios procedentes de madera y nueces podría subestimar su contribución económica total.

No obstante, la identificación de un servicio ecosistémico no implica automáticamente que este pueda incorporarse como ingreso monetario dentro de un flujo de caja. Para hacerlo se requiere disponer de una unidad biofísica cuantificable, un método de valoración definido y, cuando corresponda, un precio o mecanismo de mercado verificable. En ausencia de estos elementos, resulta metodológicamente más apropiado reconocer el beneficio y analizar su relevancia que asignarle un valor monetario hipotético.

En consecuencia, la evaluación económica desarrollada en este capítulo adopta un enfoque progresivo. En primer lugar, mantiene separados los **beneficios privados comercializables**, ya cuantificados en la evaluación financiera, de los **beneficios ambientales y sociales** asociados con la especie. En segundo lugar, identifica cuáles de estos últimos cuentan con información suficiente para una valoración cuantitativa y cuáles deben permanecer como beneficios reconocidos, pero no monetizados. Esta distinción evita incrementar artificialmente la rentabilidad mediante la asignación de precios a servicios para los cuales no existe evidencia empírica suficiente.

14.5.1. De la evaluación financiera a la evaluación económica

La evaluación financiera y la evaluación económica responden a preguntas diferentes. La primera examina si una inversión resulta atractiva para quien aporta los recursos y recibe los ingresos; por ello utiliza los precios, costos y condiciones de financiamiento relevantes para el productor. La segunda amplía la unidad de análisis y considera los costos y beneficios generados para la sociedad, incluidos aquellos que no se transan directamente en mercados.

En el caso analizado, la evaluación financiera incorpora como beneficios privados la venta de **nueces y madera**, mientras que los costos corresponden al establecimiento, mantenimiento y manejo silvicultural de la plantación. Sobre esta base se calcularon el VAN, la TIR y la relación B/C bajo una tasa de descuento del 12 %. Estos indicadores no deben recalcularse simplemente agregando beneficios ambientales sin modificar el marco metodológico, porque ello mezclaría una evaluación privada con una evaluación económica.

Para *J. neotropica*, los beneficios considerados desde una perspectiva económica pueden organizarse conceptualmente en tres grupos, de acuerdo con su relación con el mercado y con las posibilidades actuales de valoración. La Tabla 14.14 sintetiza esta clasificación y el tratamiento adoptado para cada grupo en el presente capítulo.

Tabla 14.14

Clasificación de los beneficios de Juglans neotropica según sus posibilidades de valoración económica

Tipo de beneficio	Ejemplos en *Juglans neotropica*	Tratamiento en el capítulo
Productos con mercado	Nueces, madera.	Valoración monetaria en 14.4.
Servicios con posibilidad de valoración biofísica y económica	Almacenamiento de carbono.	Cuantificación condicionada a la evidencia disponible.
Servicios ecosistémicos y sociales sin valoración monetaria suficiente	Hábitat, biodiversidad, protección del suelo, regulación microclimática, funciones paisajísticas y culturales.	Reconocimiento y análisis, sin incorporarlos artificialmente al flujo monetario.

Nota. La clasificación diferencia la existencia de un beneficio de su posibilidad de valoración monetaria. La ausencia de un precio de mercado no implica ausencia de valor económico.

Esta clasificación es especialmente importante porque evita la **doble contabilización**. Por ejemplo, un sistema agroforestal puede simultáneamente producir nueces, almacenar carbono, proporcionar sombra y ofrecer hábitat para fauna; sin embargo, estos beneficios no pueden sumarse monetariamente sin comprobar previamente que corresponden a servicios distintos, que su valoración utiliza unidades independientes y que no representan diferentes expresiones del mismo proceso ecológico.

Otro aspecto relevante es la escala de análisis. Los ingresos por madera y nueces son apropiables directamente por el productor, mientras que beneficios como conservación de biodiversidad, conectividad ecológica o regulación ambiental pueden extenderse más allá de los límites de la propiedad. Esta diferencia explica por qué una alternativa forestal puede presentar una determinada rentabilidad privada y, simultáneamente, generar beneficios sociales adicionales que no aparecen en sus estados financieros.

Por esta razón, la evaluación económica de *J. neotropica* desarrollada en este capítulo no pretende asignar un precio a todas las funciones ecológicas de la especie. Su propósito es **identificar y organizar los beneficios adicionales a los retornos privados, monetizando únicamente aquellos para los cuales existe información biofísica y económica suficientemente sustentada**. Este criterio resulta especialmente importante frente a horizontes de largo plazo y evita atribuir una precisión económica artificial a servicios ecosistémicos cuya valoración todavía presenta incertidumbre.

14.5.2. Almacenamiento de carbono como servicio ecosistémico

Además de la producción de madera y nueces, las plantaciones y sistemas agroforestales con *J. neotropica* proporcionan servicios ecosistémicos que amplían su importancia económica y ambiental. Entre ellos, el almacenamiento de carbono constituye uno de los servicios mejor documentados para la especie en Ecuador y representa un componente que puede incorporarse en evaluaciones más amplias de su contribución a la mitigación del cambio climático.

Una referencia empírica para este análisis corresponde al estudio realizado en Pimampiro, provincia de Imbabura, donde Ramírez et al. (2019) evaluaron dos sistemas de *J. neotropica* de aproximadamente 20 años: una plantación pura y otra asociada con *C. arabica*. Ambos sistemas se encontraban en el mismo predio, a aproximadamente 2100 m s. n. m., habían sido establecidos con un espaciamiento de 3 × 3 m y compartían condiciones topográficas y edáficas comparables.

La estimación se realizó a partir de mediciones dasométricas y modelos alométricos desarrollados para las condiciones del sitio. La biomasa aérea del componente forestal se estimó utilizando DAP y altura total, mientras que para transformar la biomasa en carbono se aplicó un factor de conversión de 0,5. El estudio incorporó además el carbono contenido en el detritus superficial.

Los resultados mostraron diferencias entre los dos sistemas para los reservorios considerados. La plantación pura almacenó 13,17 Mg C/ha, mientras que el sistema de nogal asociado con café alcanzó 16,11 Mg C/ha. En este último, 15,53 Mg C/ha correspondieron al componente forestal y 0,58 Mg C/ha al detritus; en la plantación pura los valores fueron 13,08 y 0,09 Mg C/ha, respectivamente. En las condiciones evaluadas, el sistema asociado presentó aproximadamente 22,3 % más carbono almacenado que la plantación pura para los componentes cuantificados en el estudio.

La Tabla 14.15 sintetiza el carbono almacenado en el componente forestal y el detritus de ambos sistemas, permitiendo comparar su contribución al almacenamiento total cuantificado.

Tabla 14.15

Carbono almacenado en plantaciones de Juglans neotropica con y sin asociación con café en Pimampiro, Imbabura

Sistema	Componente forestal (Mg C/ha)	Detritus (Mg C/ha)	Carbono total considerado (Mg C/ha)
Plantación pura de *J. neotropica*	13,08	0,09	**13,17**
J. neotropica + *C. arabica*	15,52	0,58	**16,11**

Nota. Valores correspondientes al carbono almacenado en el componente forestal y el detritus de plantaciones de aproximadamente 20 años estudiadas en Pimampiro. Elaborado con base en Ramírez et al. (2019).

La diferencia observada entre ambos sistemas debe interpretarse con cautela. Los autores relacionan el mayor desempeño del sistema asociado con el aporte adicional de materia orgánica, una mayor disponibilidad de nutrientes y agua y las condiciones generadas por el cultivo asociado; sin embargo, los resultados corresponden a las condiciones particulares del sitio estudiado y no constituyen una tasa general de almacenamiento aplicable a todas las plantaciones de *J. neotropica*. Esta precaución es particularmente importante para una evaluación económica, pues el carbono almacenado depende de la edad, densidad, crecimiento, manejo, condiciones edafoclimáticas y componentes considerados en la cuantificación.

Debe diferenciarse, además, este resultado del valor de **19,99 Mg C/ha** citado dentro del mismo artículo, ya que este último corresponde a otro estudio realizado en un sistema agroforestal asociado con granadilla y no a las plantaciones de nogal con y sin café evaluadas por Ramírez et al. (2019).

La tesis que antecedió a la publicación científica evaluó un conjunto más amplio de reservorios, incluyendo explícitamente el carbono del suelo y el carbono total del sistema. Por esta razón, los valores globales informados en ese trabajo no son directamente comparables con los **13,17 y 16,11 Mg C/ha** publicados posteriormente para el componente forestal y el detritus, y no deben combinarse dentro de una misma estimación sin homogeneizar previamente los reservorios considerados.

Desde la perspectiva económica desarrollada en este capítulo, estos resultados permiten reconocer el almacenamiento de carbono como un beneficio biofísico relevante de los sistemas evaluados. Su existencia no equivale automáticamente a un ingreso financiero para el propietario. Para incorporarlo al flujo de caja sería necesario definir un mecanismo efectivo de compensación o mercado, la cantidad de carbono elegible, los costos de medición, verificación y transacción, así como las condiciones de adicionalidad y permanencia correspondientes. En consecuencia, el carbono no se incorpora como ingreso en la evaluación financiera base de madera y nueces, sino que se reconoce como un beneficio susceptible de valoración económica bajo escenarios y mecanismos específicos.

14.5.3. Servicios ecosistémicos no monetizados

La contribución económica de *J. neotropica* trasciende los productos comercializables y el almacenamiento de carbono. La presencia de la especie en plantaciones, sistemas agroforestales, formaciones naturales y espacios arbolados genera funciones ecológicas que pueden beneficiar tanto al propietario como al conjunto de la sociedad. Sin embargo, muchos de estos beneficios carecen de mercados directos o de información suficiente para establecer valores monetarios específicos para las condiciones analizadas en esta obra.

Desde la perspectiva de la evaluación económica, la ausencia de un precio observable no implica ausencia de valor. Los servicios ecosistémicos comprenden las contribuciones que los ecosistemas realizan al bienestar humano y pueden incluir servicios de provisión, regulación y mantenimiento, así como contribuciones de carácter cultural. En el caso de *J. neotropica*, varios de estos beneficios han sido documentados mediante estudios y observaciones presentados en los capítulos anteriores del libro.

Entre los servicios de **regulación y mantenimiento** se encuentra la protección del suelo. La cobertura arbórea, la producción de hojarasca y el desarrollo del sistema radical contribuyen a mantener la cobertura superficial, incorporar materia orgánica y participar en los procesos de reciclaje de nutrientes. Estas funciones adquieren particular importancia en los paisajes andinos, donde la pendiente, el uso agropecuario y la exposición del suelo pueden incrementar la susceptibilidad a procesos erosivos.

La presencia del componente arbóreo también modifica las condiciones ambientales bajo el dosel. La interceptación de radiación, el sombreado y la

evapotranspiración contribuyen a generar condiciones microclimáticas diferentes de las existentes en áreas completamente abiertas. En sistemas agroforestales, estas modificaciones pueden interactuar con los cultivos asociados y con las condiciones de humedad del suelo. No obstante, su efecto productivo y su magnitud dependen de la densidad arbórea, estructura del dosel, edad de los árboles, manejo y condiciones particulares del sitio; por ello, **no se asigna un beneficio monetario uniforme a la regulación microclimática**.

Otro servicio relevante corresponde al **mantenimiento de hábitat para la biodiversidad**. La evidencia presentada en esta obra muestra que los sistemas donde participa *J. neotropica* pueden proporcionar estructuras utilizadas por diferentes grupos de fauna. En el sistema agroforestal multiestrato de Yuyucocha, por ejemplo, se han registrado interacciones de aves, insectos y pequeños mamíferos con los distintos componentes leñosos del sistema. Estas observaciones evidencian que el valor de una plantación o sistema agroforestal no se restringe a la biomasa comercial producida, sino que incluye funciones de refugio, alimentación, desplazamiento y utilización estructural del arbolado.

Esta función adquiere especial importancia cuando *J. neotropica* forma parte de sistemas diversificados. A diferencia de una plantación concebida exclusivamente como una unidad productora de madera, los sistemas agroforestales pueden combinar árboles de diferentes estratos, cultivos, especies frutales y otros componentes vegetales, incrementando la heterogeneidad estructural del sitio. Sin embargo, atribuir monetariamente a *J. neotropica* la totalidad de los beneficios de biodiversidad observados en estos sistemas sería metodológicamente incorrecto, porque estos resultan de la interacción del conjunto de sus componentes.

La especie puede contribuir igualmente a la **estructura y conectividad del paisaje** cuando se mantiene o establece en linderos, cercas vivas, sistemas lineales, sistemas agroforestales, plantaciones y áreas de restauración. En paisajes altamente transformados, estos elementos arbóreos pueden complementar los remanentes de vegetación natural y proporcionar estructuras intermedias entre diferentes usos del suelo. La magnitud de este servicio depende, sin embargo, de la configuración espacial del paisaje y no solamente de la presencia individual de árboles de nogal.

A estos beneficios se añade la dimensión **cultural y patrimonial** de la especie. Como se ha documentado en los capítulos precedentes, *J. neotropica* mantiene relaciones históricas con las poblaciones andinas a través de diferentes usos de su madera, frutos y otras partes del árbol, además de su presencia en paisajes rurales y urbanos. Estas relaciones representan valores que difícilmente pueden reducirse a los precios de la madera o de las nueces y que, por tanto, forman parte de una valoración ampliada de la especie.

Clasificación de los beneficios no incorporados al flujo financiero

Para mantener la trazabilidad entre la evidencia ecológica y la valoración económica, la Tabla 14.16 organiza los principales servicios ecosistémicos y contribuciones asociados con *J. neotropica* que son reconocidos en este capítulo, pero que no se incorporan monetariamente en la evaluación financiera.

Tabla 14.16

Servicios ecosistémicos asociados con Juglans neotropica no incorporados monetariamente en la evaluación financiera

Servicio o contribución	Manifestación en los sistemas analizados	Tratamiento económico
Contribuciones a la protección del suelo	Cobertura arbórea, hojarasca, sistema radical y aporte de materia orgánica.	Reconocido, no monetizado.
Regulación microclimática	Sombra, modificación de radiación y condiciones bajo el dosel.	Reconocido, no monetizado.
Hábitat para biodiversidad	Uso del arbolado y de los sistemas asociados por fauna.	Reconocido, no monetizado.
Contribuciones a la conectividad del paisaje	Presencia en SAF, linderos, sistemas lineales y áreas de restauración.	Reconocido, no monetizado.
Valores culturales y patrimoniales	Usos tradicionales, artesanales, alimentarios y presencia histórica en paisajes andinos.	Reconocido, no monetizado.
Almacenamiento de carbono	Cuantificado en plantaciones con y sin asociación con café.	Cuantificado biofísicamente en 14.5.2, no incorporado al flujo financiero.

Nota. La inclusión de un servicio en la tabla indica que existe evidencia de la función o contribución en los sistemas analizados; no implica que se haya determinado su valor económico monetario. El almacenamiento de carbono se presenta separadamente debido a que dispone de estimaciones biofísicas específicas para *J. neotropica*.

La decisión de no monetizar estos servicios responde a un criterio de **prudencia metodológica**. Asignar valores monetarios requeriría, según el servicio considerado, métodos específicos de valoración —por ejemplo, costos evitados, costos de reposición, preferencias declaradas o reveladas, precios hedónicos o transferencia de beneficios— y evidencia que permita relacionar el valor estimado específicamente con *J. neotropica* y con el sistema evaluado. Aplicar valores procedentes de otros ecosistemas, especies o regiones sin los ajustes correspondientes podría introducir una incertidumbre mayor que la que se pretende resolver.

Existe además el riesgo de **doble contabilización**. Un mismo proceso ecológico puede contribuir simultáneamente a diferentes servicios; por ejemplo, la cobertura arbórea puede participar en la protección del suelo, regulación microclimática, almacenamiento de carbono y provisión de hábitat. La suma directa de valoraciones independientes podría contabilizar más de una vez componentes derivados de una misma función ecológica.

En consecuencia, los indicadores financieros calculados en el apartado 14.4 representan solamente una **fracción del valor generado por los sistemas con *J. neotropica***. El VAN, la TIR y la relación B/C reflejan los flujos monetarios considerados para el productor, pero no expresan el valor de los servicios ecosistémicos identificados en este apartado. Esta distinción es particularmente relevante cuando las plantaciones se

establecen no solo con fines productivos, sino también como componentes de programas de restauración, sistemas agroforestales o estrategias de conservación de paisajes andinos.

14.5.4. Implicaciones para la inversión, restauración productiva e incentivos

La evaluación económica de *J. neotropica* muestra que la decisión de establecer y manejar la especie no debería sustentarse exclusivamente en el ingreso esperado por la madera al final del turno. La producción de nueces, el almacenamiento de carbono y los demás servicios ecosistémicos analizados amplían la diversidad de beneficios generados durante el ciclo de la plantación y permiten interpretar su desempeño desde una perspectiva que integra producción, conservación y restauración.

Esta consideración resulta particularmente importante para una especie forestal nativa de crecimiento relativamente lento y con turnos de producción de madera prolongados. En estas condiciones, la concentración de una parte importante de los ingresos madereros hacia el final del ciclo constituye una limitación financiera para el productor. La producción periódica de nueces, una vez alcanzada una etapa comercial estable, introduce flujos intermedios que pueden contribuir a reducir parcialmente esa limitación, mientras que la madera mantiene su función como producto de mayor valor al final del turno.

Desde esta perspectiva, los sistemas con *J. neotropica* pueden responder a diferentes **objetivos de inversión**. Una plantación orientada principalmente a madera requiere privilegiar la conformación del fuste, las podas, los raleos y la selección progresiva de árboles de calidad. En sistemas agroforestales, en cambio, el componente arbóreo puede combinar la producción futura de madera y nueces con cultivos agrícolas y otros componentes productivos. Finalmente, en proyectos de restauración, la producción constituye una función complementaria a objetivos ecológicos como recuperación de cobertura arbórea, protección del suelo, almacenamiento de carbono y mantenimiento de hábitat.

Esta diversidad de objetivos tiene una consecuencia económica importante: **una misma medida de rentabilidad no representa necesariamente el valor completo de todos los sistemas**. El VAN, la TIR y la relación beneficio/costos estimados en este capítulo permiten evaluar los flujos monetarios incluidos en el modelo, pero no incorporan beneficios ambientales que no generan actualmente un ingreso directo para el propietario. Por ello, una intervención destinada a restauración puede presentar una rentabilidad financiera diferente de una plantación estrictamente comercial y, al mismo tiempo, generar beneficios sociales y ambientales adicionales.

La distinción entre **rentabilidad financiera y valor económico ampliado** resulta, por tanto, fundamental. La primera expresa los costos e ingresos monetarios asumidos por el inversionista o productor; la segunda reconoce además beneficios que pueden recaer sobre otros actores o sobre la sociedad. La protección del suelo, el mantenimiento de hábitat, la conectividad del paisaje y parte de los beneficios climáticos constituyen ejemplos de contribuciones cuyo valor no necesariamente es capturado por quien asume los costos de establecimiento y manejo.

Esta diferencia proporciona una justificación económica para considerar **mecanismos de incentivos** cuando las plantaciones o sistemas agroforestales generan beneficios ambientales de interés colectivo. Tales mecanismos podrían incluir programas públicos de restauración, incentivos para el establecimiento y manejo de especies forestales nativas, esquemas de pago por servicios ambientales o mecanismos vinculados con resultados climáticos. Su aplicabilidad dependerá de la normativa, los programas existentes y los requisitos técnicos correspondientes; por ello, estos mecanismos se consideran en este capítulo como **posibilidades de financiamiento o compensación y no como ingresos garantizados**.

El almacenamiento de carbono analizado en el apartado 14.5.2 ilustra esta diferencia. La evidencia obtenida en Pimampiro documenta que las plantaciones de *J. neotropica*, tanto puras como asociadas con café, almacenan carbono cuantificable. Sin embargo, mientras no exista para una plantación determinada un mecanismo que reconozca y remunere ese servicio, dicho almacenamiento constituye un beneficio biofísico y económico potencial, pero no un flujo financiero efectivo. Esta distinción evita sobreestimar la rentabilidad de los escenarios evaluados.

Una lógica semejante se aplica a los demás servicios ecosistémicos. Su reconocimiento puede ser relevante para la selección y priorización de proyectos, aun cuando no sean monetizados. Por ejemplo, entre dos alternativas con resultados financieros semejantes, aquella que además contribuya a restaurar cobertura arbórea, conservar una especie nativa, proporcionar hábitat y generar productos forestales puede ofrecer mayores beneficios desde una perspectiva territorial y social.

En este contexto, la **restauración productiva** constituye un ámbito particularmente pertinente para *J. neotropica*. La incorporación de la especie en sistemas agroforestales, plantaciones mixtas, arreglos lineales u otras modalidades compatibles con las condiciones del sitio permite vincular la recuperación de funciones ecológicas con la generación de productos aprovechables. No obstante, la selección del sistema debe responder a sus objetivos específicos y no a la expectativa de que todos los beneficios identificados se expresen simultáneamente o con igual magnitud en cualquier condición de establecimiento.

Implicaciones económicas según el objetivo del sistema

Las implicaciones económicas y ecosistémicas asociadas con *J. neotropica* dependen de los objetivos y de la configuración del sistema en el que se incorpora la especie. Una plantación orientada a la producción de madera presenta una estructura temporal de costos y beneficios diferente de aquella destinada a producción mixta, integrada en sistemas agroforestales o establecida con fines de restauración y conservación. La Tabla 14.17 sintetiza estas diferencias considerando los principales beneficios, el horizonte temporal predominante y sus implicaciones económicas.

Tabla 14.17

Interpretación de los principales beneficios económicos y ecosistémicos de sistemas con Juglans neotropica según su orientación

Orientación	Beneficios principales	Horizonte predominante	Implicación económica
Producción de madera	Madera de calidad y productos de raleos cuando sean comercializables.	Largo plazo	Requiere inversión y manejo silvicultural durante un turno prolongado.
Producción mixta	Madera + nueces.	Mediano y largo plazo.	Diversifica los flujos de ingreso durante el ciclo productivo.
Sistema agroforestal	Productos del componente arbóreo + producción agrícola asociada.	Corto, mediano y largo plazo.	Diversifica productos y distribuye temporalmente los beneficios.
Restauración productiva	Productos aprovechables + recuperación de funciones ecológicas.	Mediano y largo plazo.	Combina objetivos privados y beneficios ambientales.
Conservación/restauración	Almacenamiento de carbono y contribuciones a hábitat, suelo, conectividad y conservación de la especie.	Largo plazo.	Parte importante de los beneficios puede no ser capturada directamente por el propietario.

Nota. La tabla representa una interpretación conceptual de los sistemas analizados en esta obra. Los beneficios efectivamente obtenidos dependen de las condiciones del sitio, diseño, densidad, manejo, edad, mercados disponibles y objetivos de cada intervención.

La principal implicación para la toma de decisiones es que los incentivos destinados a *J. neotropica* deberían orientarse, cuando corresponda, a **reducir la brecha temporal entre los costos iniciales y los beneficios de largo plazo**, particularmente cuando el establecimiento de la especie genere simultáneamente beneficios ambientales que trasciendan al propietario. El apoyo al establecimiento, mantenimiento inicial o manejo silvicultural podría modificar las condiciones financieras del productor sin necesidad de asignar artificialmente un precio a cada servicio ecosistémico.

En consecuencia, la evaluación desarrollada en este capítulo permite distinguir tres niveles complementarios de beneficio: **los ingresos directamente comercializables**, representados principalmente por madera y nueces; **los servicios biofísicamente cuantificables, pero no necesariamente comercializables**, como el almacenamiento de carbono; y **los servicios ecosistémicos reconocidos pero no monetizados**, entre ellos protección del suelo, hábitat, conectividad y valores culturales. Esta diferenciación evita la doble contabilización y proporciona una base más consistente para analizar proyectos productivos, agroforestales y de restauración con *J. neotropica*.

14.6. Cadena de valor de *J. neotropica*

El análisis financiero desarrollado en los apartados anteriores permite estimar los costos, ingresos y rentabilidad asociados con la producción de *J. neotropica*. Sin embargo,

la generación de valor económico no concluye en la unidad de producción. La madera y las nueces atraviesan diferentes procesos de transformación, comercialización y consumo en los que intervienen actores con funciones, costos y márgenes diferentes. Por esta razón, la evaluación económica de la especie se complementa con un análisis de cadena de valor. El análisis empírico presentado en este apartado se concentra principalmente en los circuitos identificados en la provincia de Imbabura y no pretende representar una cadena nacional de la especie.

Una cadena de valor puede entenderse como la secuencia de funciones y relaciones mediante las cuales un producto transita desde la provisión de insumos y la producción primaria hasta su transformación, comercialización y consumo final. Este enfoque permite identificar no solamente los procesos físicos que experimenta el producto, sino también los actores que participan, las relaciones existentes entre ellos y las oportunidades para generar y distribuir valor agregado. El enfoque ValueLinks desarrollado por la cooperación alemana incorpora entre sus componentes el mapeo y análisis de la cadena, las relaciones comerciales, la prestación de servicios, el financiamiento y las posibilidades de mejoramiento de su funcionamiento.

En el caso de *J. neotropica*, este enfoque resulta particularmente pertinente porque la especie genera productos con características y circuitos comerciales diferentes. La **madera** se vincula principalmente con depósitos de madera, carpinterías, talleres de muebles, ebanistería y artesanía; mientras que los **frutos y nueces** conforman una cadena que comprende recolección, extracción de la nuez, secado, limpieza, acondicionamiento, empaque y comercialización. Por consiguiente, no existe una única secuencia comercial para la especie, sino cadenas relacionadas con productos y actores específicos.

El análisis presentado en este capítulo se desarrolló en el marco del **Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026)** y se sustentó en información primaria recopilada en diferentes localidades de Imbabura. Parte de estos resultados fue utilizada posteriormente en la investigación publicada por Eraso et al. (2026), mientras que información complementaria obtenida durante el programa se incorpora específicamente en esta obra. De esta manera, el análisis de la cadena se articula con los datos de precios, costos e ingresos utilizados en los apartados financieros precedentes.

14.6.1. Enfoque metodológico para el análisis de la cadena de valor

El análisis de la cadena de valor de *J. neotropica* se desarrolló mediante una combinación de referentes conceptuales sobre cadenas de valor y levantamiento de información primaria en la provincia de Imbabura. Como base conceptual se consideró el enfoque de cadenas promovido por la cooperación alemana GTZ, que permite analizar de manera integrada las funciones desarrolladas desde la producción hasta el consumo, los actores que participan en cada eslabón, sus relaciones y los procesos mediante los cuales se agrega valor a un producto.

Esta base metodológica fue complementada con la experiencia derivada de estudios previos de cadenas de productos forestales realizados en Ecuador y Perú y, específicamente para *J. neotropica*, con el trabajo desarrollado dentro del **Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026)**. El análisis consideró dos productos principales de

la especie —**madera y nueces**— debido a que presentan procesos de transformación, actores y circuitos de comercialización diferentes.

Una parte de esta investigación fue sistematizada posteriormente por Eraso et al. (2026) para el estudio de la cadena de valor de *J. neotropica* en Imbabura. En ella, se aplicó un **enfoque cualitativo de carácter fenomenológico**, orientado a comprender las experiencias, percepciones y relaciones de los actores directamente vinculados con el aprovechamiento, transformación, comercialización y gestión de la especie. La información se obtuvo mediante **entrevistas semiestructuradas** a actores de la cadena, entre ellos talladores, aserradores, comerciantes y representantes institucionales.

La identificación progresiva de participantes se apoyó en un procedimiento de **muestreo en cadena o bola de nieve**, mediante el cual los actores inicialmente contactados facilitaron la identificación de otros participantes relacionados con los diferentes eslabones. El proceso de entrevistas continuó hasta alcanzar **saturación teórica**, es decir, hasta que la incorporación de nuevos participantes dejó de aportar categorías sustancialmente diferentes para la comprensión del fenómeno estudiado. En el artículo científico se analizaron finalmente **21 entrevistas**, realizadas entre marzo y septiembre de 2025.

La información cualitativa obtenida fue sometida a **análisis temático mediante ATLAS.ti**, permitiendo organizar los testimonios e identificar categorías, relaciones entre actores, problemas de abastecimiento y comercialización, percepciones sobre el recurso y otros componentes relevantes de la cadena. De esta manera, la metodología publicada no buscó construir una muestra estadísticamente representativa del conjunto de productores o establecimientos de Imbabura, sino comprender la estructura y dinámica de la cadena a partir de actores directamente relacionados con ella.

Paralelamente, dentro del Programa de Investigación *Juglans* se recopilaron **datos económicos y productivos complementarios** que no necesariamente formaron parte de todas las variables analizadas en el artículo científico, pero que constituyen información primaria utilizada en este libro. Para la madera, el levantamiento se realizó principalmente en **Ibarra y San Antonio de Ibarra**, mediante visitas a depósitos de compra y venta de madera, carpinterías, talleres de muebles y establecimientos artesanales que utilizan nogal. Se registraron precios, formas de adquisición de la materia prima, procesos de transformación y actores participantes.

Para los frutos y nueces se siguieron diferentes eslabones de la cadena. En **Pimampiro**, mediante informantes vinculados con la plantación posteriormente convertida en sistema agroforestal nogal–café, se obtuvo información sobre edad de inicio de la producción, productividad de frutos por árbol y precio de venta en el sitio de producción. En **Cahuasquí** se documentaron las actividades de recolección de frutos, extracción de las nueces, secado, limpieza, empaque y comercialización. Finalmente, en puntos de venta de **Ibarra**, particularmente en el entorno del parque La Merced, se recopiló información sobre precios de comercialización y, mediante el conocimiento de los vendedores acerca del abastecimiento y circulación del producto, se complementó la reconstrucción de los eslabones precedentes.

Por consiguiente, la unidad de análisis no estuvo constituida exclusivamente por el producto final, sino por la interacción entre **productos, funciones, actores, relaciones y flujos de comercialización**. Para cada cadena se procuró identificar el origen del producto, los participantes, las operaciones realizadas, las transformaciones físicas, los mecanismos de comercialización, los precios observados y el destino de los productos. La Tabla 14.18 sintetiza los productos y componentes analizados y las principales localidades de Imbabura donde se obtuvo la información.

Tabla 14.18

Productos, localidades y componentes considerados en el análisis de la cadena de valor de Juglans neotropica en Imbabura

Producto o componente	Localidad principal	Aspectos considerados
Madera	Ibarra y San Antonio de Ibarra	Abastecimiento, comercialización, transformación, carpintería, mueblería, artesanía y precios.
Frutos en origen	Pimampiro	Inicio de producción, productividad, comercialización en origen y precio.
Nueces procesadas	Cahuasquí	Recolección, extracción, secado, limpieza, empaque y comercialización.
Nueces comercializadas	Ibarra	Comercialización, precios, abastecimiento y relaciones con eslabones precedentes.

Nota. Elaboración propia con información primaria obtenida en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026). Parte de la información correspondiente a la cadena de valor fue sistematizada y publicada por Eraso et al. (2026).

Los datos económicos obtenidos mediante este procedimiento deben interpretarse como **valores empíricos correspondientes a los mercados y actores investigados en Imbabura**, y no como precios oficiales o promedios nacionales. Esta delimitación es particularmente importante en *J. neotropica*, debido a que una parte de sus productos circula mediante mercados locales, relaciones directas entre actores y actividades artesanales, donde los precios pueden variar según dimensiones y calidad de la madera, grado de transformación, volumen comercializado y condiciones de negociación.

Finalmente, para el análisis económico se diferenció entre **precio de comercialización, costos de transformación y valor agregado**. Una diferencia de precios entre dos eslabones no se interpretó automáticamente como utilidad, debido a que la transformación y comercialización incorporan costos de mano de obra, transporte, procesamiento, secado, almacenamiento, pérdidas, empaque y otras operaciones. Esta precaución metodológica permite relacionar el análisis de cadenas con la evaluación financiera desarrollada previamente sin atribuir márgenes económicos que no hayan sido determinados empíricamente.

14.6.2. Cadena de valor de la madera de *J. neotropica*

La madera constituye uno de los productos de mayor importancia económica y cultural de *J. neotropica* en Imbabura. Su utilización se encuentra estrechamente relacionada con actividades de carpintería, ebanistería, elaboración de muebles y,

particularmente, con la tradición artesanal de San Antonio de Ibarra. Sin embargo, la cadena no corresponde a un circuito industrial estandarizado, sino a una estructura en la que intervienen propietarios de árboles, intermediarios, aserradores, depósitos de madera, carpinteros, mueblistas, talladores y otros artesanos.

El estudio realizado en Imbabura en el marco del Programa de Investigación *Juglans* permitió identificar estos actores y reconstruir las relaciones existentes entre aprovechamiento, comercialización y transformación de la madera. Parte de esta información fue posteriormente sistematizada y publicada por Eraso et al. (2026), quienes analizaron la cadena de valor mediante entrevistas en profundidad a 21 actores, entre ellos talladores, aserradores, comerciantes y autoridades ambientales.

Eslabón de producción y abastecimiento de madera

El primer eslabón está constituido por los **árboles y sus propietarios**, localizados principalmente en fincas, sistemas agroforestales, linderos, plantaciones y otros espacios rurales. A diferencia de una cadena sustentada exclusivamente en plantaciones comerciales con turnos y volúmenes previamente programados, una parte del abastecimiento local de nogal procede de árboles individuales o de pequeños grupos de árboles distribuidos en el paisaje.

Esta característica condiciona los siguientes eslabones de la cadena. La oferta depende de la existencia de árboles disponibles para aprovechamiento, de la decisión del propietario y de las condiciones que permiten su movilización y comercialización. Por tanto, el abastecimiento no presenta necesariamente la regularidad que caracteriza a cadenas forestales sustentadas en plantaciones comerciales de gran escala.

La investigación de Eraso et al. (2026) identifica precisamente una tensión entre el elevado valor atribuido a la madera y la conservación del recurso. Los autores describen este fenómeno como una **"paradoja del valor"**: la elevada demanda de madera de nogal puede incentivar la corta prematura de árboles jóvenes, reduciendo simultáneamente su potencial futuro para producir madera de mayores dimensiones y productos no madereros, particularmente nueces.

Intermediación, aserrío y comercialización primaria

Una vez adquirido o aprovechado el árbol, la madera ingresa a un segundo conjunto de actividades relacionadas con **apeo, troceado, aserrío, transporte y comercialización**. Dependiendo de las características de la operación, algunas de estas funciones pueden ser realizadas por actores diferentes o integrarse dentro de una misma transacción.

Los aserradores cumplen una función particularmente importante porque transforman el fuste en piezas que pueden incorporarse posteriormente a procesos de carpintería, mueblería o talla. Los comerciantes y depósitos, por su parte, facilitan la circulación de la madera entre quienes disponen del recurso y quienes requieren materia prima para transformarla.

Las observaciones realizadas en **Ibarra y San Antonio de Ibarra** permitieron registrar directamente precios y condiciones de comercialización en depósitos, carpinterías y talleres que trabajan con madera de nogal. Estos registros constituyen la base empírica local utilizada también para sustentar los precios de la madera considerados anteriormente en el modelamiento financiero.

En este contexto, debe interpretarse el precio de aproximadamente **USD 214/m³** utilizado en el escenario financiero del apartado 14.4. Este valor no representa una cotización oficial nacional ni un precio internacional de referencia, sino un **valor de mercado observado localmente durante el levantamiento de información efectuado en 2025**. Por esta razón, su utilización en el modelo se restringe al escenario construido para esta obra y no debe extrapolarse como precio uniforme de la madera de *J. neotropica* en Ecuador.

Transformación y agregación de valor

El siguiente eslabón corresponde a la **transformación secundaria de la madera**. En esta etapa participan carpinteros, mueblistas, ebanistas, talladores y otros artesanos que convierten la materia prima en productos de mayor elaboración.

La transformación modifica sustancialmente la naturaleza económica del producto. El árbol en pie, la troza, la madera aserrada y un mueble o pieza tallada constituyen productos diferentes, cada uno de los cuales incorpora cantidades sucesivas de trabajo, conocimientos, herramientas, energía, infraestructura y habilidades técnicas. En consecuencia, el incremento observado en el precio a medida que se avanza por la cadena **no puede interpretarse directamente como margen de utilidad**, pues cada etapa incorpora nuevos costos y procesos productivos.

En San Antonio de Ibarra esta agregación de valor posee además una dimensión cultural. La demanda de nogal se relaciona con una tradición artesanal en la que las propiedades de la madera son valoradas para talla, ebanistería y fabricación de muebles. El estudio publicado en 2026 muestra que la fuerte demanda de madera por parte del centro artesanal de San Antonio constituye uno de los elementos centrales de la dinámica socioeconómica de la especie en Imbabura.

De esta manera, el valor de la madera no depende exclusivamente del volumen comercializado. Una proporción importante del valor final se genera mediante la **transformación**, particularmente cuando la madera se incorpora a productos con mayor intensidad de trabajo artesanal.

Comercialización de productos elaborados y consumidor final

El último eslabón comprende la comercialización de muebles, piezas de carpintería, tallas y otros productos elaborados. En esta etapa, el producto deja de comercializarse principalmente como materia prima forestal y adquiere atributos relacionados con el diseño, la calidad de elaboración, el acabado, la funcionalidad y, en determinadas piezas, el valor artístico y cultural.

La estructura simplificada de la cadena puede representarse de la siguiente manera:

Propietario/árbol en pie → aprovechamiento y aserrío → comerciante o depósito → carpintería, mueblería o taller artesanal → producto elaborado → consumidor final.

Esta secuencia no implica que todos los productos recorran obligatoriamente cada eslabón. Pueden existir relaciones directas entre propietarios y artesanos, integración de varias funciones por un mismo actor o formas adicionales de intermediación. Por ello, debe entenderse como una representación de las **principales funciones identificadas en la cadena**, y no como un circuito comercial único.

Actores y funciones de la cadena

La cadena de valor de la madera de *J. neotropica* involucra distintos actores que participan desde la disponibilidad del recurso forestal hasta la comercialización y uso de los productos elaborados. Cada uno desempeña funciones específicas relacionadas con la producción, transformación, movilización, comercialización y consumo, incorporando diferentes formas de agregación de valor a medida que la madera avanza en la cadena. La Tabla 14.19 sintetiza los principales actores identificados y las funciones que cumplen en este proceso.

Tabla 14.19

Principales actores y funciones identificados en la cadena de valor de la madera de Juglans neotropica en Imbabura

Actor o eslabón	Función principal	Forma de agregación de valor
Propietario/productor	Conservación, manejo y disponibilidad del árbol.	Producción del recurso forestal.
Aprovechamiento/aserrío	Apeo, troceado y transformación primaria.	Conversión del árbol en trozas y madera aserrada.
Intermediario/comerciante	Compra, transporte y articulación entre actores.	Disponibilidad y movilización de la materia prima.
Depósito de madera	Acopio y comercialización.	Clasificación y disponibilidad de madera.
Carpintería/mueblería	Transformación secundaria.	Elaboración de muebles y productos funcionales.
Tallador/artesano	Transformación especializada.	Incorporación de trabajo artesanal y contenido cultural.
Comerciante de productos elaborados	Comercialización.	Vinculación del producto terminado con el mercado.
Consumidor final	Adquisición y uso.	Demanda que sostiene la cadena.

Nota. Elaborado con base en la información obtenida en el Programa de Investigación *Juglans* y en Eraso et al. (2026).

La paradoja del valor en la cadena de la madera

Uno de los resultados más relevantes del análisis es que el elevado valor comercial y cultural de la madera **no garantiza por sí mismo la conservación de la especie**. Eraso et al. (2026) encontraron que la presión de la demanda puede producir el efecto contrario: estimular el aprovechamiento prematuro, reducir la disponibilidad futura de árboles maduros y afectar otros beneficios que solamente pueden generarse mientras el árbol permanece en pie.

Esta situación adquiere particular importancia desde la perspectiva bioeconómica. Un árbol aprovechado tempranamente genera un ingreso inmediato por madera, pero interrumpe la posibilidad de continuar produciendo nueces, almacenar carbono, incrementar su volumen y proporcionar otros servicios ecosistémicos. La decisión económica no debería considerar, por tanto, únicamente el precio de la madera al momento de la corta, sino el **flujo de beneficios que puede generar el árbol durante su permanencia en el sistema productivo**.

Esta interpretación conecta directamente la cadena de valor con el modelamiento desarrollado en los apartados anteriores. La producción combinada de nueces durante una parte importante del ciclo y madera al final del turno constituye una alternativa conceptualmente distinta al aprovechamiento temprano motivado exclusivamente por la demanda inmediata de madera.

El estudio de Eraso et al. (2026) concluye precisamente que la conservación de *J. neotropica* requiere avanzar hacia formas de gobernanza, manejo comunitario e integración del paisaje en las cuales el árbol en pie pueda ser reconocido por un conjunto de valores superior al derivado exclusivamente de su aprovechamiento maderero.

Implicaciones para el fortalecimiento de la cadena

El principal desafío consiste, por tanto, en **vincular el valor generado en los eslabones de transformación con la sostenibilidad de la base productiva**. La existencia de una tradición artesanal consolidada representa una oportunidad para desarrollar una cadena diferenciada alrededor de madera procedente de árboles y plantaciones manejados técnicamente. Sin embargo, para que esta oportunidad contribuya efectivamente a la conservación, el incremento del valor en los eslabones finales debería generar señales económicas que favorezcan el establecimiento, manejo y permanencia de nuevos árboles.

Desde esta perspectiva, el fortalecimiento de la cadena de madera de *J. neotropica* no depende únicamente de incrementar el volumen aprovechado. Requiere mejorar la articulación entre producción forestal, manejo silvicultural, transformación y comercialización, procurando que la demanda de una madera de alto valor se traduzca en incentivos para **plantar, manejar y conservar árboles hasta alcanzar dimensiones y calidad apropiadas**, en lugar de intensificar la extracción prematura.

Esta secuencia muestra que la generación de valor asociada a *J. neotropic*a no se concentra únicamente en la producción primaria, sino que se incrementa progresivamente mediante el aprovechamiento, la transformación de la madera y su incorporación en

productos elaborados. La Figura 14.1 ilustra esta transición a partir de diferentes etapas observadas en Ecuador, desde el árbol en pie hasta un producto elaborado con madera de nogal.

Figura 14.1

Secuencia de aprovechamiento y agregación de valor de la madera de Juglans neotropica en Ecuador

Nota. **A)** Árbol de *J. neotropica* en pie; **B)** trozas obtenidas después del aprovechamiento; **C)** madera aserrada, con apreciación de su coloración y veteado; **D)** producto elaborado con madera de nogal. Fotografía B: Villota (2023).

14.6.3. Cadena de valor de frutos y nueces

La producción de frutos de *J. neotropica* configura una cadena de valor distinta de la correspondiente a la madera. Mientras el aprovechamiento maderero implica la corta del árbol, los frutos constituyen un producto recurrente cuya cosecha puede generar ingresos periódicos mientras el individuo permanece en pie, característica relevante dentro del aprovechamiento multipropósito de la especie.

El análisis realizado en el marco del Programa de Investigación *Juglans* permitió reconocer diferentes etapas de esta cadena mediante información obtenida en **Pimampiro, Cahuasquí e Ibarra**. Pimampiro aportó información sobre producción y comercialización en origen; Cahuasquí permitió documentar las operaciones de procesamiento y acondicionamiento; e Ibarra, la comercialización en el mercado local.

En conjunto, estos registros permitieron reconstruir el tránsito del producto desde el árbol hasta el consumidor.

Producción y comercialización en origen

El primer eslabón corresponde a propietarios y productores que mantienen árboles de *J. neotropica* en plantaciones, sistemas agroforestales u otras formas de uso de la tierra. En **Pimampiro**, informantes vinculados con la plantación posteriormente integrada en un sistema agroforestal nogal–café proporcionaron información sobre el inicio de la producción, productividad y comercialización en origen. Los primeros frutos pueden aparecer aproximadamente entre los **4 y 5 años**, aunque una producción más estable y con potencial comercial se alcanza alrededor de los **8–10 años**. Como referencias para el análisis financiero de 14.4 se utilizaron una producción aproximada de **500 frutos por árbol y año** y un precio en origen de **USD 14 por 500 frutos**; estos valores corresponden al sistema estudiado y no deben generalizarse para toda la especie.

Procesamiento y agregación de valor

En **Cahuasquí** se documentaron las operaciones posteriores a la producción: **recolección, extracción de las nueces, secado, limpieza, selección o acondicionamiento, empaque y comercialización**. Estas actividades transforman el fruto primario en un producto acondicionado para el mercado e incorporan mano de obra, materiales, tiempo y otros costos; por ello, la diferencia entre el precio en origen y el precio de la nuez comercializada no puede interpretarse directamente como utilidad.

Este eslabón evidencia una característica relevante de la cadena: es posible **agregar valor sin cortar el árbol**, mediante el procesamiento y acondicionamiento de un producto obtenido periódicamente.

Comercialización local

En **Ibarra**, particularmente en el entorno del parque La Merced, se registró la comercialización de nueces acondicionadas y se obtuvo información de comerciantes sobre precios, procedencia y abastecimiento. Estos registros complementaron la reconstrucción de las relaciones entre producción, procesamiento y mercado.

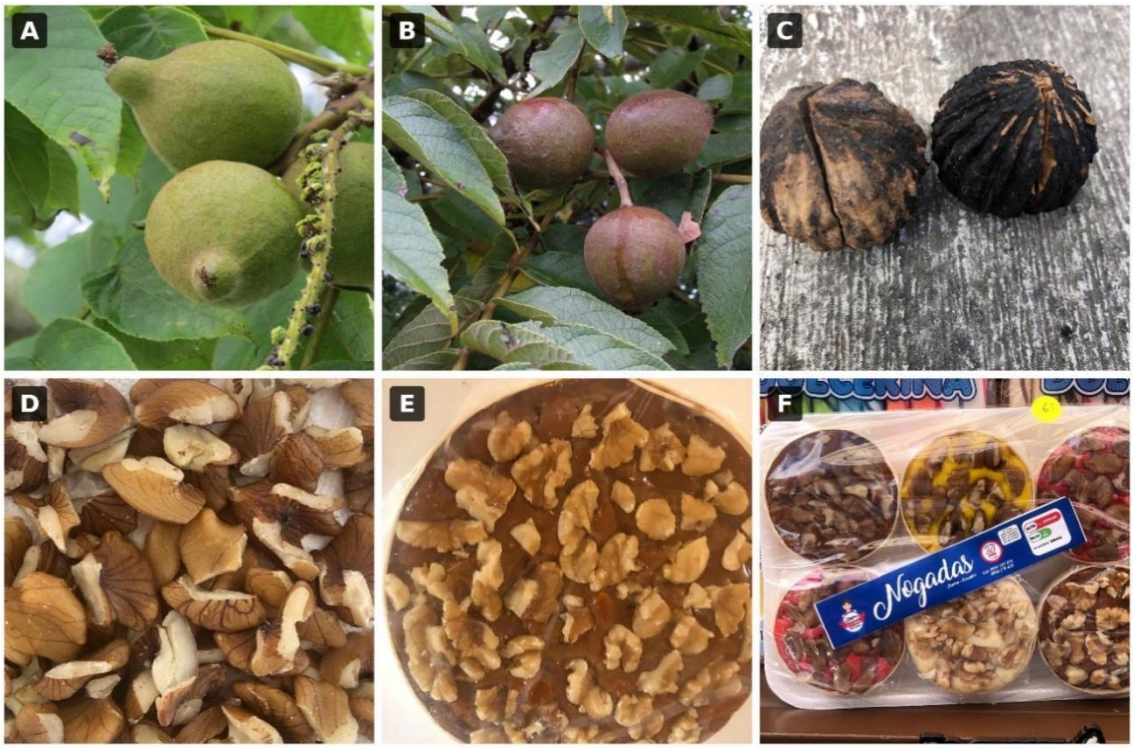
La secuencia general identificada puede sintetizarse como:

Árbol/productor → recolección del fruto → extracción de la nuez → secado y limpieza → acondicionamiento y empaque → comercialización → consumidor final.

Las diferentes etapas observadas muestran la transformación progresiva del fruto hasta su comercialización como producto alimenticio. La Figura 14.2 presenta registros de algunas de estas etapas en Cahuasquí e Ibarra.

Figura 14.2

Proceso de transformación de la nuez de Juglans neotropica y comercialización de las nogadas en Ibarra, Ecuador



Nota. **A)** Frutos verdes en el árbol. **B)** Frutos en estado avanzado de madurez. **C)** Endocarpios obtenidos después de retirar la cubierta externa y realizar la limpieza. **D)** Nueces comestibles extraídas mediante el partido del endocarpio. **E)** Nogada terminada, con fragmentos de nuez incorporados en la superficie. **F)** Presentaciones comerciales de nogadas. Las fotografías A–C fueron tomadas en el sector San Lucía y las fotografías D–F en los quioscos de expendio del parque La Merced, ciudad de Ibarra, Imbabura, Ecuador.

La secuencia representa las funciones principales de la cadena, pero no implica que todos los productos recorran obligatoriamente los mismos actores: algunos productores pueden comercializar directamente los frutos, mientras otros participantes integran procesamiento y venta.

Actores y agregación de valor

La cadena de valor de los frutos y nueces de *J. neotropica* comprende una secuencia de actores y procesos mediante los cuales el producto primario adquiere progresivamente condiciones que facilitan su conservación, transformación y comercialización. La agregación de valor se produce principalmente mediante la recolección y el acopio, la extracción de la nuez, el secado, la limpieza, la selección, el empaque y la comercialización. La Tabla 14.20 sintetiza los principales actores

identificados en Imbabura, las funciones que desempeñan y las formas de agregación de valor asociadas a cada eslabón.

Tabla 14.20

Principales actores y funciones identificados en la cadena de valor de frutos y nueces de Juglans neotropica en Imbabura

Eslabón o actor	Función principal	Producto resultante	Agregación de valor
Productor/propietario	Producción y manejo de los árboles	Frutos	Producción primaria
Recolector	Recolección y acopio	Frutos recolectados	Concentración del producto
Procesador	Extracción de la nuez	Nueces	Transformación primaria
Procesador/acondicionador	Secado, limpieza y selección	Nueces acondicionadas	Conservación y presentación
Empacador/comercializador	Empaque y comercialización	Producto listo para venta	Acceso al mercado
Comerciante minorista	Venta	Nueces comercializadas	Disponibilidad para el consumidor
Consumidor final	Compra y consumo	Producto final	Demanda de la cadena

Nota. Elaboración propia con base en información primaria obtenida en Pimampiro, Cahuasquí e Ibarra en el marco del Programa de Investigación *Juglans* (2021–2026).

Complementariedad entre producción de nueces y madera

Desde una perspectiva bioeconómica, nueces y madera no constituyen necesariamente alternativas excluyentes. Bajo un manejo multipropósito, los árboles pueden producir frutos durante una parte importante del turno y proporcionar madera cuando alcanzan las dimensiones y calidad previstas para su aprovechamiento. Los ingresos periódicos procedentes de las nueces complementan así el ingreso de largo plazo asociado con la madera, como se analizó financieramente en 14.4.

Esta complementariedad presenta una característica particularmente relevante para la conservación productiva de *J. neotropica*: **parte del valor económico puede generarse manteniendo el árbol en pie**. El fortalecimiento del procesamiento y comercialización de las nueces puede, por tanto, generar incentivos económicos adicionales para mantener los árboles en pie durante períodos más prolongados.

Oportunidades de fortalecimiento de la cadena

Las oportunidades de agregación de valor se concentran principalmente en el mejoramiento de la recolección, secado, limpieza, clasificación, presentación, empaque y articulación entre productores, procesadores y mercados. Estas acciones podrían favorecer la diferenciación del producto y una mayor retención del valor en los territorios donde se cultiva y conserva la especie.

Los resultados deben interpretarse, sin embargo, como evidencia de **circuitos locales estudiados en Imbabura** y no como una representación de la cadena de nueces de *J. neotropica* para todo Ecuador. Su escala, regularidad de abastecimiento, demanda y márgenes económicos requieren estudios posteriores.

14.7. Valoración económica del arbolado urbano de *J. neotropica*

La valoración económica del arbolado urbano permite expresar monetariamente atributos de los árboles que no quedan representados por el precio de su madera. En este contexto, el valor de un individuo en pie incorpora su condición como componente de la infraestructura verde urbana y puede considerar características como tamaño, especie, estado fitosanitario, localización y posibilidades de reposición. Por tanto, **el valor económico de un árbol urbano no debe equipararse con su valor maderable**, ya que responde a una finalidad de valoración diferente.

Para *J. neotropica*, esta perspectiva adquiere especial interés debido a que ejemplares adultos se encuentran formando parte del arbolado de ciudades y espacios periurbanos andinos. En estos ambientes, además de constituir biomasa potencialmente aprovechable, los árboles permanecen integrados al paisaje y proporcionan funciones ambientales y sociales cuya pérdida no queda adecuadamente representada mediante la estimación exclusiva del volumen y precio de la madera.

En Ecuador, **García (2021)** realizó una valoración económica de árboles urbanos de *J. neotropica* utilizando una metodología basada en el área de la sección transversal del tronco y factores de ajuste relacionados con la especie, condición fitosanitaria y localización. Los resultados mostraron una marcada variación del valor económico entre individuos de diferente tamaño y características: aproximadamente **USD 257 para árboles con DAP cercano a 32 cm**, entre **USD 422 y 610 para individuos con diámetros de aproximadamente 41–45 cm**, y valores próximos a **USD 883 para ejemplares de alrededor de 60 cm de DAP**.

Estos valores deben interpretarse como **estimaciones correspondientes al método de valoración, condiciones y contexto considerados por García (2021)** y no como precios de mercado aplicables de manera general a cualquier árbol de *J. neotropica*. La valoración del arbolado urbano depende tanto de las dimensiones del individuo como de los coeficientes utilizados para representar su condición y localización; en consecuencia, árboles con diámetros similares pueden alcanzar valoraciones diferentes.

La importancia económica de esta aproximación radica precisamente en que modifica la unidad de análisis utilizada en los apartados precedentes. Mientras la evaluación financiera de las plantaciones expresa costos e ingresos principalmente por hectárea y las cadenas de valor analizan los productos que circulan entre los diferentes actores, la valoración urbana considera al árbol individual vivo como un componente valorado de la infraestructura verde urbana. De este modo, permite reconocer económicamente la pérdida que puede representar la eliminación de un ejemplar más allá del volumen de madera recuperable.

Esta diferenciación resulta especialmente pertinente para *J. neotropica*. Como se ha mostrado a lo largo de esta obra, un árbol en pie puede generar frutos, almacenar

carbono, formar parte de la estructura del paisaje y cumplir funciones ecológicas y socioculturales. En el medio urbano, varias de estas funciones adquieren una expresión adicional debido a la localización del individuo y a su relación con espacios públicos, áreas verdes y elementos del paisaje urbano. La valoración monetaria constituye, por tanto, **una herramienta complementaria y no sustitutiva de la valoración ecológica, cultural o patrimonial**.

Desde el punto de vista de la gestión, disponer de estimaciones monetarias del arbolado puede contribuir a sustentar técnicamente decisiones relacionadas con conservación, reposición y compensación por pérdida de árboles. Sin embargo, su aplicación requiere metodologías explícitas y criterios consistentes, evitando interpretar el valor calculado como equivalente al precio comercial del árbol o de su madera. En el caso de *J. neotropica*, la evidencia disponible muestra que la consideración económica del individuo vivo amplía sustancialmente el análisis desarrollado en este capítulo: **el valor asociado a la especie no se limita a los productos extraíbles; también puede vincularse con la permanencia del árbol y las funciones que desempeña en el territorio**.

14.8. Evaluación ambiental asociada a la producción de madera y nueces

La evaluación económica de *J. neotropica* puede complementarse con indicadores ambientales que permitan reconocer los requerimientos de recursos y las emisiones asociadas con la obtención de sus productos. En el Campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte se desarrollaron estudios de caso orientados a estimar la huella de carbono y otros componentes de la huella ecológica de productos forestales, incluyendo la madera y las nueces de *J. neotropica* (Cachimuel Muñoz, 2024; Molina Quilca, 2024; Tapia Quilambaqui, 2025).

Estos trabajos deben interpretarse como **aproximaciones locales**, debido a que emplearon unidades funcionales, límites y procedimientos de cálculo diferentes. Molina Quilca (2024), por ejemplo, combinó información documental con comprobación de campo y señaló que una parte importante de los datos requeridos para el cálculo procedió de fuentes secundarias. En consecuencia, los resultados no constituyen todavía un análisis de ciclo de vida normalizado de *J. neotropica*, sino una base empírica inicial para identificar componentes y etapas ambientalmente relevantes de su producción.

Huella de carbono asociada a la producción de madera

Molina Quilca (2024) estimó las emisiones asociadas con la producción de madera rolliza a partir de insumos utilizados durante las etapas de establecimiento y manejo, así como del combustible requerido para la corta y troceado. Para el árbol estudiado se consideraron fungicida, materia orgánica, abonos orgánicos, fertilizante, insecticida y combustible. El individuo utilizado como referencia tenía 30 años y un volumen estimado de 0,150 m³.

La suma de las emisiones asociadas a estos insumos fue de **3,53 kg CO_2e para 0,150 m³ de madera rolliza**, equivalente, mediante la conversión realizada en el estudio, a aproximadamente **23,59 kg CO_2e/m^3**. Este resultado representa las emisiones

contabilizadas dentro de los límites considerados por el estudio y no debe confundirse con el carbono almacenado en la biomasa del árbol.

Cachimuel Muñoz (2024) incorporó precisamente esta segunda dimensión al estimar conjuntamente las emisiones y el carbono almacenado. Para *J. neotropica* reportó un almacenamiento equivalente a 737,68 kg CO_2e frente a 2,968 kg CO_2e de emisiones consideradas, obteniendo un balance de **−734,71 kg CO_2e** en el caso evaluado. El signo negativo expresa que, bajo los supuestos y límites utilizados en ese estudio, el almacenamiento estimado en la biomasa superó las emisiones contabilizadas durante el proceso productivo.

Esta distinción es importante para interpretar ambientalmente la madera de nogal: **deben diferenciarse las emisiones generadas durante la producción y el aprovechamiento de la madera del carbono previamente fijado y almacenado por el árbol durante su crecimiento**. La relación entre ambos componentes determina el balance obtenido y depende de la edad y dimensiones del árbol, la productividad, las operaciones silviculturales, los insumos utilizados y los límites establecidos para la evaluación.

Huella hídrica, energética y uso del suelo

Cachimuel Muñoz (2024) amplió el análisis mediante cuatro componentes: huella de carbono, hídrica, energética y de uso del suelo. Para *J. neotropica* estimó una huella hídrica de **40 442 litros**, una huella energética asociada a **1,474 kg CO_2e** y una huella de uso del suelo de **0,1662 ha** para la unidad de producción evaluada.

Al integrar estos componentes, el estudio obtuvo para la madera de *J. neotropica* una **huella ecológica total de 0,131 gha**, conformada por una huella de carbono de −0,076 gha, hídrica de 0,040 gha, energética de 0,0003 gha y de uso del suelo de 0,1662 ha.

Estos resultados muestran además que un balance favorable de carbono **no equivale necesariamente a ausencia de impacto ambiental**. La producción forestal utiliza suelo, agua y energía, de modo que la evaluación ambiental debe considerar conjuntamente los diferentes componentes y no limitarse al carbono almacenado.

Huella de carbono asociada a la producción de nueces

Tapia Quilambaqui (2025) abordó una dimensión complementaria al evaluar la huella de carbono de **1 kg de nuez de *J. neotropica***. El estudio consideró actividades de vivero, plantación, secado y transporte, incorporando los insumos y consumos energéticos asociados con estas etapas.

Los resultados permiten identificar los **puntos críticos del proceso**. Entre los componentes contabilizados destacan el secado, con **5,376 kg CO_2e**, y el combustible, con **1,162 kg CO_2e**, además de las emisiones atribuidas a fungicidas, materia orgánica, abonos, fertilizantes e insecticidas. El estudio reportó 22,44 kg CO_2e para el cálculo por planta y posteriormente realizó una conversión para expresar el resultado por kilogramo de nuez.

Tapia Quilambaqui (2025) evaluó la huella de carbono asociada con la producción de nueces de *J. neotropica,* considerando actividades de vivero, plantación, secado y transporte. Entre los componentes contabilizados, el secado y el uso de combustible presentaron contribuciones relevantes a las emisiones del proceso. Debido a las características metodológicas y a las conversiones empleadas en el estudio, los resultados se interpretan como una aproximación correspondiente al sistema evaluado y no como un valor generalizable para la especie.

Implicaciones para el manejo y la agregación de valor

Los tres estudios permiten identificar una característica relevante del aprovechamiento multipropósito de *J. neotropica*. En la producción de madera, el crecimiento prolongado del árbol permite acumular carbono en la biomasa, mientras que las emisiones contabilizadas se relacionan principalmente con insumos y operaciones de establecimiento, manejo y aprovechamiento. En la producción de nueces, los resultados disponibles identifican al secado y al uso de combustibles entre los componentes relevantes de las emisiones contabilizadas.

Esta diferencia conecta directamente la evaluación ambiental con las cadenas de valor analizadas en 14.6. La agregación de valor no depende solamente de incrementar el precio del producto, sino también de **mejorar la eficiencia de los procesos mediante los cuales ese valor se genera**. En el caso de las nueces, los resultados permiten identificar como líneas potenciales de mejoramiento la eficiencia energética del secado, la optimización del transporte, el procesamiento local y el uso eficiente de insumos; su efecto ambiental y económico deberá evaluarse específicamente antes de recomendar alternativas tecnológicas concretas. En la madera, una cuestión que deberá evaluarse es si la obtención de mayores volúmenes comerciales por árbol permite reducir determinados impactos expresados por unidad de producto.

En conjunto, los estudios de Yuyucocha aportan una primera aproximación cuantitativa para incorporar la dimensión ambiental al análisis económico de *J. neotropica*. Sin embargo, debido a las diferencias metodológicas entre los trabajos y al uso parcial de información secundaria, sus resultados deben considerarse **estudios de caso y no valores de referencia nacionales para la especie**. Será necesario avanzar hacia evaluaciones con límites del sistema y unidades funcionales homogéneas, información primaria del ciclo productivo y procedimientos estandarizados que permitan comparar sistemas de producción y alternativas tecnológicas.

En este contexto, la evaluación ambiental complementa el análisis financiero y de cadenas de valor al identificar puntos del ciclo productivo donde es posible reducir el uso de insumos, las emisiones y la generación de residuos, así como mejorar el aprovechamiento de materiales y subproductos. Esta perspectiva constituye una base para analizar la **economía circular de *J. neotropica*** desde procesos concretos de producción, transformación y uso de recursos.

14.9. Economía circular y aprovechamiento integral

La economía circular propone reducir la generación de residuos y mantener durante el mayor tiempo posible el valor de productos, materiales y recursos mediante

estrategias de aprovechamiento, reutilización, transformación y reincorporación a nuevos procesos productivos. En el ámbito forestal, esta perspectiva adquiere particular relevancia porque un mismo recurso biológico puede generar productos principales, coproductos y subproductos en diferentes etapas de su cadena de valor.

En *J. neotropica*, las evidencias recopiladas a lo largo de esta obra permiten identificar **posibilidades de aprovechamiento integral**, aunque no constituyen todavía una cadena circular plenamente desarrollada. Esta distinción es importante: la existencia de múltiples productos derivados del nogal no demuestra, por sí sola, circularidad. Para ello es necesario que los materiales que normalmente quedarían fuera del producto principal sean recuperados, transformados o reincorporados a otros usos, disminuyendo pérdidas y generando valor adicional.

Aprovechamiento integral de la madera

La madera constituye el producto de mayor valor unitario dentro de la cadena forestal de *J. neotropica*. Como se analizó en 14.6, su transformación genera piezas destinadas a muebles, carpintería y artesanías, pero también materiales de dimensiones menores y residuos procedentes del aserrado y elaboración.

Desde una perspectiva de aprovechamiento integral, la utilización de piezas de menor tamaño en artesanías y objetos elaborados constituye una alternativa para **incrementar el rendimiento del recurso maderable**. Esto adquiere especial interés en San Antonio de Ibarra, donde la presencia de carpinteros, mueblistas y artesanos permite articular diferentes escalas de transformación. Sin embargo, la información disponible no permite todavía cuantificar qué proporción de los residuos de madera de nogal se recupera ni cuáles son sus destinos finales. Por ello, más que afirmar la existencia de un circuito cerrado, los resultados permiten identificar una **oportunidad para mejorar el aprovechamiento de la materia prima**.

Esta diferenciación es relevante también desde el punto de vista económico. Una mayor utilización del volumen extraído permitiría distribuir el valor del árbol entre productos de distintas dimensiones y calidades, reduciendo la fracción de material sin aprovechamiento comercial.

Frutos, nueces y biomasa residual

La cadena de frutos y nueces presenta otras posibilidades de aprovechamiento. Como se documentó en 14.6.3, en Cahuasquí el fruto atraviesa diferentes operaciones hasta obtener una nuez acondicionada para su comercialización. Estas etapas generan materiales que no forman parte del producto alimenticio final, particularmente las cubiertas externas del fruto y el endocarpio.

El potencial de estos materiales debe interpretarse con prudencia. Los capítulos precedentes han documentado usos tradicionales de diferentes partes del nogal, entre ellos su utilización como fuente de colorantes, pero **no se dispone todavía de información cuantitativa que demuestre el aprovechamiento sistemático de los residuos generados por la cadena comercial de nueces de Cahuasquí**. Esta constituye precisamente una oportunidad para futuras investigaciones orientadas a caracterizar los

volúmenes generados y evaluar alternativas técnica, ambiental y económicamente viables para su utilización.

Esta perspectiva guarda relación con los resultados de 14.8. Si el procesamiento de las nueces requiere energía, transporte e insumos, una estrategia de circularidad debería considerar simultáneamente la **eficiencia del proceso y el destino de los materiales residuales**, evitando que la agregación de valor económico implique simplemente trasladar impactos hacia otras etapas de la cadena.

Uso de colorantes naturales: articulación entre cadenas productivas

Un ejemplo particularmente ilustrativo del aprovechamiento diversificado del nogal corresponde al uso tradicional de sus colorantes naturales. En Imbabura se documentó la elaboración de un **sombrero de cabuya (*Furcraea andina*) teñido con nogal**, producto en el que convergen dos recursos vegetales de importancia local: la fibra proporciona la materia prima estructural y el nogal aporta el colorante utilizado durante el proceso de elaboración (Figura 14.3).

Figura 14.3

Sombrero elaborado con fibra de cabuya (Furcraea andina) y teñido con colorantes naturales obtenidos de Juglans neotropica

Nota. Producto artesanal que integra fibra de cabuya y colorantes naturales derivados del nogal, como ejemplo de articulación entre recursos biológicos y conocimientos tradicionales en Imbabura, Ecuador. Fotografía: Jessica Tabango.

De aprovechamiento múltiple a circularidad

Los casos descritos permiten diferenciar dos conceptos relacionados, pero no equivalentes. El **aprovechamiento integral** busca utilizar una mayor proporción de los recursos que proporciona el árbol —madera, frutos y otros materiales—, mientras que la **economía circular** supone avanzar adicionalmente hacia la reducción de residuos, recuperación de materiales y reincorporación de subproductos a nuevos procesos.

En este sentido, las cadenas de *J. neotropica* estudiadas en Ecuador muestran actualmente **elementos y oportunidades para avanzar hacia esquemas de economía circular**, más que un modelo circular plenamente establecido. Entre las posibilidades identificadas se encuentran un mayor aprovechamiento de piezas y residuos de madera, la valorización de materiales derivados del procesamiento de frutos y nueces, el uso de colorantes naturales y la articulación de estos productos con actividades artesanales locales.

El desarrollo de estas alternativas requiere determinar cantidades disponibles, propiedades de los materiales, costos de transformación, demanda y desempeño ambiental. Esta última dimensión es particularmente importante: **un nuevo uso de un residuo no constituye necesariamente una alternativa circular favorable si su procesamiento demanda más recursos o genera impactos superiores al beneficio obtenido**. Por ello, la evaluación económica desarrollada en este capítulo y los indicadores ambientales analizados en 14.8 proporcionan bases complementarias para valorar futuras alternativas de aprovechamiento.

En conjunto, la evidencia disponible permite plantear para *J. neotropica* una transición desde cadenas centradas en productos individuales hacia un **aprovechamiento más integral de los recursos y subproductos**, pero evitando atribuir a los sistemas actualmente estudiados un grado de circularidad que todavía no ha sido demostrado.

14.10. Bioeconomía y conservación productiva de *J. neotropica*

La bioeconomía se fundamenta en la utilización sostenible de recursos biológicos, conocimientos y procesos de innovación para generar productos, servicios y valor económico, procurando compatibilizar las actividades productivas con la conservación de los recursos naturales. En el ámbito forestal, esta perspectiva amplía el análisis más allá de la producción de madera e incorpora productos forestales no madereros, transformación local, conocimientos tradicionales, servicios ecosistémicos y nuevas formas de agregación de valor.

Desde esta perspectiva, *J. neotropica* presenta características particularmente relevantes. A lo largo de esta obra se ha documentado que la especie puede proporcionar **madera de alto valor, frutos y nueces, colorantes naturales y otros productos**, además de formar parte de sistemas agroforestales, plantaciones, arbolado urbano y remanentes de vegetación natural. Esta diversidad de funciones permite analizar su aprovechamiento no desde un producto único, sino desde las diferentes formas de valor que pueden generarse durante la permanencia y el ciclo productivo del árbol.

Diversificación de productos y fuentes de ingreso

La madera representa uno de los principales productos comerciales de *J. neotropica*, particularmente por sus características para ebanistería, muebles, carpintería y artesanías. Sin embargo, una estrategia bioeconómica basada exclusivamente en este producto concentra el ingreso en el momento de la corta y supone la extracción definitiva del individuo.

La producción de frutos modifica esta relación. Como se analizó en 14.4 y 14.6.3, los árboles pueden generar nueces durante una parte prolongada de su ciclo de vida, proporcionando **ingresos periódicos sin necesidad de cortar el árbol**. La evaluación financiera mostró precisamente la importancia de considerar conjuntamente estos flujos con el ingreso de largo plazo procedente de la madera.

Esta complementariedad constituye uno de los fundamentos de la **conservación productiva** de la especie. La generación de valor económico mientras el árbol permanece en pie puede modificar los incentivos asociados a su manejo: el individuo deja de representar exclusivamente una reserva de madera para convertirse también en un componente productivo capaz de generar diferentes beneficios durante diferentes etapas de su ciclo.

Agregación de valor y articulación territorial

La bioeconomía no depende solamente de producir biomasa, sino también de la capacidad de **transformarla y agregar valor en los territorios donde se genera**. Las cadenas estudiadas en Imbabura muestran diferentes expresiones de esta posibilidad. En San Antonio de Ibarra, la madera se vincula con carpinterías, talleres de muebles y actividades artesanales; en Pimampiro se documentó la producción y comercialización de frutos en origen; en Cahuasquí, operaciones de procesamiento y acondicionamiento de nueces; y en Ibarra, su comercialización local.

Estos casos muestran que el valor económico de *J. neotropica* se distribuye entre diferentes actores y actividades. El productor genera la materia prima, mientras que las etapas de transformación, acondicionamiento y comercialización incorporan trabajo y conocimiento y modifican progresivamente el valor del producto. Por ello, una estrategia bioeconómica orientada al territorio debería procurar que una parte significativa de esa agregación de valor permanezca vinculada con productores, procesadores y emprendimientos locales.

A esta dimensión se suman los **conocimientos tradicionales** relacionados con el nogal. El empleo de colorantes naturales, documentado en el apartado anterior mediante su articulación con la elaboración artesanal en fibra de cabuya, ejemplifica cómo propiedades biológicas de la especie pueden integrarse con conocimientos y recursos locales para generar productos diferenciados. En estos casos, el valor no procede únicamente de la materia prima, sino también del conocimiento asociado con su transformación.

El árbol en pie como componente de la bioeconomía

Una perspectiva bioeconómica de *J. neotropica* no debería limitarse a los productos extraídos. La valoración económica del arbolado urbano analizada en 14.7 muestra que el **árbol vivo puede adquirir un valor económico independiente del precio de su madera**. De manera complementaria, los capítulos precedentes han documentado funciones relacionadas con almacenamiento de carbono, biodiversidad, estructura del paisaje y sistemas agroforestales.

Esto amplía considerablemente la noción de productividad. Un árbol puede generar frutos y otros productos, mantener carbono almacenado, formar parte de sistemas productivos diversificados y proporcionar funciones ambientales durante décadas antes de un eventual aprovechamiento maderero. Desde esta perspectiva, la conservación y la producción dejan de constituir necesariamente objetivos contrapuestos.

No todos estos beneficios disponen actualmente de mercados o mecanismos de remuneración, por lo que **reconocer su existencia no equivale a atribuirles automáticamente un ingreso monetario**. La incorporación efectiva de servicios ecosistémicos a estrategias bioeconómicas requeriría metodologías de valoración, mecanismos institucionales y, cuando corresponda, instrumentos de compensación o incentivos específicamente diseñados.

Conservación productiva

En esta obra, la conservación productiva puede entenderse como una estrategia mediante la cual **el aprovechamiento sostenible genera incentivos para mantener, establecer y manejar *J. neotropica***, procurando simultáneamente conservar sus recursos genéticos, funciones ecológicas y capacidad productiva.

Este enfoque resulta especialmente pertinente para una especie cuya madera posee valor comercial. La prohibición o restricción del aprovechamiento, por sí sola, no garantiza necesariamente que propietarios y productores mantengan árboles durante períodos prolongados. De manera complementaria, un aprovechamiento orientado únicamente a maximizar ingresos de corto plazo puede conducir a cortas anticipadas y pérdida de individuos reproductivos. Entre ambos extremos, la conservación productiva plantea que la generación de beneficios económicos puede contribuir a la permanencia de la especie cuando está acompañada por **manejo silvicultural, regeneración, reposición, conservación de diversidad genética y aprovechamiento planificado**.

Los sistemas agroforestales analizados en esta obra ofrecen una expresión concreta de esta posibilidad. La incorporación o conservación de *J. neotropica* junto con cultivos y otros componentes productivos permite que el árbol forme parte de la economía de la unidad de producción sin requerir que el terreno sea destinado exclusivamente a una plantación forestal. De igual manera, la producción de frutos puede proporcionar retornos durante el período en que se desarrolla el recurso maderable.

De las oportunidades bioeconómicas a su implementación

Los resultados presentados en este capítulo muestran, por tanto, diferentes bases para una bioeconomía asociada con *J. neotropica*: producción de madera y nueces, transformación local, conocimientos tradicionales, aprovechamiento integral, valoración del árbol en pie y posibilidades de articulación con sistemas agroforestales y restauración productiva. Sin embargo, estas oportunidades se encuentran en **diferentes niveles de desarrollo** y no deben interpretarse como componentes de un modelo bioeconómico ya consolidado.

Algunas cuentan con cadenas comerciales identificables, como la madera y las nueces; otras corresponden a usos tradicionales o experiencias locales; y otras representan posibilidades que requieren investigación, innovación, organización de actores y mecanismos de mercado. La evaluación ambiental presentada en 14.8 muestra, además, que la generación de valor económico debe considerar los recursos y emisiones asociados con los procesos productivos, mientras que 14.9 evidencia que el aprovechamiento múltiple no equivale automáticamente a economía circular.

En consecuencia, el potencial bioeconómico de *J. neotropica* depende no solo de **cuánto valor puede generar la especie**, sino de las condiciones bajo las cuales ese valor se produce, distribuye y reinvierte en su permanencia y manejo. Esta relación entre valor y conservación resulta fundamental, porque una especie económicamente valiosa no está necesariamente mejor conservada. Por el contrario, bajo determinadas condiciones de mercado, gobernanza y aprovechamiento, su elevado valor puede convertirse en un incentivo para la extracción y pérdida de individuos.

14.11. Barreras socioecológicas y paradoja del valor

Las oportunidades económicas asociadas con *J. neotropica* no se traducen automáticamente en incentivos para su conservación. Esta relación fue analizada en Imbabura por Eraso et al. (2026), quienes estudiaron las condiciones socioecológicas que intervienen en la cadena de valor de la especie y las tensiones existentes entre aprovechamiento, mercado y conservación. El estudio empleó un enfoque cualitativo fenomenológico basado en 21 entrevistas semiestructuradas a actores vinculados con la cadena, realizadas hasta alcanzar saturación teórica, y un análisis temático apoyado en ATLAS.ti.

Los resultados evidenciaron una contradicción central denominada **paradoja del valor**: el elevado valor atribuido a la madera de nogal y su demanda sostenida, particularmente en actividades artesanales y de transformación, no necesariamente favorecen la conservación del recurso; por el contrario, bajo determinadas condiciones pueden incrementar la presión sobre los árboles y estimular su aprovechamiento prematuro (Eraso et al., 2026).

Valor económico y presión sobre el recurso

La madera de *J. neotropica* mantiene una demanda importante debido a sus características para muebles, ebanistería, talla y artesanías. En Imbabura, esta relación adquiere particular relevancia por la actividad artesanal de San Antonio de Ibarra. Sin

embargo, el estudio encontró que la demanda de madera puede incentivar la corta de árboles jóvenes antes de que alcancen mayores dimensiones y desarrollen plenamente su potencial de producción de frutos y aporte reproductivo.

Esta situación genera una consecuencia que trasciende el aprovechamiento maderero. La corta anticipada elimina árboles que podrían continuar creciendo, producir frutos durante varios años y aportar material reproductivo a las poblaciones locales. De esta manera, una decisión económicamente atractiva en el corto plazo puede reducir simultáneamente las posibilidades futuras de producción de madera de mayores dimensiones, el aprovechamiento de productos forestales no madereros y la permanencia de individuos reproductivos que forman parte de la diversidad genética local.

La paradoja adquiere especial significado a la luz de los resultados presentados anteriormente en este capítulo. La evaluación financiera mostró que el árbol puede generar flujos periódicos mediante las nueces antes del aprovechamiento final de la madera; la valoración urbana evidenció que el individuo vivo posee un valor diferente del correspondiente exclusivamente a su madera; y el análisis bioeconómico mostró posibilidades de generar valor manteniendo el árbol dentro del sistema productivo. La corta prematura puede interrumpir simultáneamente varios de estos flujos potenciales.

Barreras institucionales y de mercado

La presión sobre el recurso no depende únicamente del precio de la madera. Eraso et al. (2026) identificaron **barreras burocráticas, comercialización informal y debilidad de la organización colectiva** entre los principales obstáculos para una gestión sostenible de la cadena.

Estas barreras muestran que la conservación de una especie económicamente valiosa no puede analizarse exclusivamente desde la rentabilidad biológica o financiera de su cultivo. Los incentivos que enfrentan propietarios, productores, intermediarios, transformadores y artesanos dependen también del acceso legal al recurso, los mecanismos de comercialización, la trazabilidad, la organización de los actores y las condiciones institucionales que regulan el aprovechamiento.

La informalidad constituye un aspecto particularmente relevante porque dificulta conocer la procedencia de la madera y establecer vínculos transparentes entre productores y consumidores. Cuando la cadena no diferencia adecuadamente la madera procedente de árboles cultivados o manejados bajo criterios sostenibles, el mercado dispone de pocos mecanismos para recompensar a quienes invierten en establecimiento, manejo y conservación de árboles durante períodos prolongados.

La dimensión temporal de la paradoja

La paradoja del valor presenta también una dimensión temporal. Como se analizó en los apartados financieros, la producción forestal requiere períodos considerablemente mayores que muchas actividades agropecuarias. Mantener un nogal hasta alcanzar dimensiones apropiadas para producir madera de calidad implica postergar una parte importante del ingreso, mientras que la corta anticipada permite obtener liquidez inmediata.

Esta diferencia entre **beneficios de corto plazo y valor acumulado de largo plazo** ayuda a comprender por qué un árbol económicamente valioso puede ser aprovechado antes de alcanzar mayores dimensiones y una trayectoria productiva más prolongada. El problema no radica, por tanto, en la ausencia de valor, sino en las condiciones bajo las cuales ese valor puede ser capturado por los diferentes actores y distribuido a través del tiempo.

Los productos no madereros adquieren especial importancia frente a esta restricción. La producción de nueces puede generar ingresos periódicos mientras el árbol continúa creciendo, contribuyendo a reducir parcialmente la distancia temporal entre el establecimiento y el ingreso final por madera. Sin embargo, como advierten Eraso et al. (2026), la corta prematura compromete precisamente la posibilidad de desarrollar estas alternativas productivas.

Del valor de la madera al valor del árbol en pie

Superar esta paradoja requiere modificar la manera en que se interpreta económicamente el recurso. Si el árbol se valora únicamente por la madera que puede obtenerse inmediatamente, los demás beneficios asociados con su permanencia quedan fuera de la decisión económica. En cambio, considerar conjuntamente crecimiento futuro, producción de frutos, funciones ambientales y posibilidades de aprovechamiento multipropósito amplía el horizonte de valoración.

Eraso et al. (2026) plantean que la conservación de largo plazo requiere avanzar hacia formas de **gobernanza policéntrica, empresas forestales comunitarias y manejo integrado del paisaje**, acompañadas por el fortalecimiento de la trazabilidad y la articulación entre conocimientos locales y prácticas silviculturales. El propósito es generar condiciones en las cuales mantener y manejar el árbol pueda resultar atractivo frente a su extracción prematura.

Esta perspectiva coincide con el concepto de **conservación productiva** planteado en 14.10. El desafío no consiste en eliminar el valor económico de *J. neotropica*, sino en conseguir que ese valor contribuya a su permanencia, regeneración y manejo. Para ello, la rentabilidad de la madera, los ingresos procedentes de las nueces, la transformación local y los demás beneficios asociados con el árbol deberían acompañarse de mecanismos que favorezcan la reposición del recurso, la conservación genética, el manejo silvicultural y la comercialización responsable.

En consecuencia, la paradoja del valor constituye un elemento central para interpretar la bioeconomía de *J. neotropica*: **una especie de elevado valor económico puede encontrarse sometida a mayor presión precisamente por ese valor si las instituciones, los mercados y los sistemas de manejo no generan incentivos suficientes para conservarla**. El tránsito desde una economía basada predominantemente en la extracción hacia una conservación productiva requiere, por tanto, actuar simultáneamente sobre la producción, las cadenas de valor y la gobernanza del recurso.

14.12. Implicaciones para la conservación y el desarrollo territorial

El análisis económico desarrollado en este capítulo muestra que el valor de *J. neotropica* no se limita al aprovechamiento de su madera. La producción de nueces, la transformación artesanal, los conocimientos tradicionales asociados a sus usos, la valoración del árbol en pie, el almacenamiento de carbono y otros servicios ecosistémicos configuran diferentes expresiones de valor que pueden coexistir durante el ciclo de vida del árbol. Esta diversidad ofrece posibilidades para vincular **producción, conservación y desarrollo territorial**, siempre que el aprovechamiento económico contribuya también al mantenimiento, regeneración y reposición del recurso.

Los estudios de costos evidencian que el establecimiento y manejo de plantaciones de *J. neotropica* requieren inversiones que varían según las condiciones del sitio, densidad, material vegetal y prácticas silviculturales. A su vez, la evaluación financiera muestra que una característica relevante de la actividad forestal es la distribución temporal de costos e ingresos: mientras una parte importante del valor de la madera se materializa en el largo plazo, la producción de frutos puede generar ingresos durante la permanencia del árbol. Esta complementariedad permite concebir sistemas productivos en los cuales el valor económico no dependa exclusivamente de la corta final.

La consecuencia para la conservación es particularmente relevante. Cuando los beneficios pueden generarse en diferentes momentos del ciclo productivo, **mantener el árbol en pie adquiere también una racionalidad económica**. La producción de frutos, su procesamiento y comercialización, junto con otras formas de aprovechamiento compatibles con la permanencia del individuo, pueden reducir parcialmente la dependencia del ingreso concentrado en la madera. Esta diversificación de flujos financieros se fundamenta en las directrices globales de la FAO (2020) sobre medios de vida sostenibles, las cuales demuestran que los beneficios derivados de los recursos no maderables articulan de manera efectiva la resiliencia socioeconómica local con la preservación activa de ecosistemas vulnerables.

En el contexto del norte de Ecuador, esta articulación se traduce directamente en un aporte a la soberanía y seguridad alimentaria familiar. Al evaluar sistemas agrosilvícolas tradicionales en el cantón Pimampiro, Yamberla (2017) evidenció que el asocio del nogal con cultivos locales no solo diversifica los ingresos mediante un sistema altamente rentable, sino que estabiliza la producción agrícola interna y resguarda el autoconsumo a través del aprovechamiento de sus frutos. De este modo, el árbol deja de ser un elemento aislado de la forestería para convertirse en un pilar de la resiliencia alimentaria territorial.

En este escenario de diversificación, los mecanismos de incentivos económicos externos juegan un rol catalizador para viabilizar la transición hacia modelos de conservación productiva. Bajo la tesis fundacional de Wunder (2005)**,** los esquemas de Pago por Servicios Ambientales (PSA) ofrecen una estructura formal para compensar a los productores por los costos de oportunidad de mantener y regenerar el recurso en tierras privadas. No obstante, dado que el nogal andino se establece frecuentemente en sistemas agroforestales fragmentados, linderos y pastizales —donde los enfoques tradicionales de deforestación evitada (como REDD+) tienen una aplicabilidad limitada—, las estrategias contemporáneas de desarrollo territorial deben migrar hacia mecanismos de

financiamiento climático basados en la captura de carbono agroforestal, créditos de biodiversidad y subsidios condicionados a la restauración del paisaje. Estos instrumentos permiten internalizar económicamente los servicios ambientales del árbol en pie durante sus etapas juveniles, cerrando la brecha financiera antes de que comience la producción comercial de nueces o madera. Sin embargo, como muestra la situación documentada en Imbabura, la existencia de un recurso de elevado valor económico no garantiza por sí misma su conservación.

De la conservación de árboles a la conservación productiva del paisaje

La evidencia reunida en esta obra muestra que *J. neotropica* se encuentra integrada en diferentes configuraciones territoriales: bosques y remanentes naturales, sistemas agroforestales, plantaciones, linderos, espacios urbanos y otros paisajes intervenidos. Cada uno de estos contextos cumple funciones diferentes y requiere estrategias específicas de conservación y manejo.

Las poblaciones naturales y los árboles remanentes mantienen especial importancia para la conservación de la diversidad genética, la reproducción y los procesos ecológicos; las plantaciones pueden incrementar la disponibilidad futura de productos forestales y disminuir la presión sobre otras fuentes de madera; los sistemas agroforestales permiten integrar la especie con diferentes actividades productivas; y el arbolado urbano mantiene individuos cuyo valor ambiental, paisajístico y social no puede reducirse al volumen de madera que contienen.

Por tanto, la conservación de *J. neotropica* requiere una **estrategia territorial diferenciada**, en la que conservación *in situ*, conservación genética, propagación, plantaciones, agroforestería, manejo silvicultural y aprovechamiento sostenible no se desarrollen como acciones independientes. Su articulación puede contribuir simultáneamente a mantener poblaciones naturales y a generar una base cultivada capaz de satisfacer parte de las necesidades productivas futuras. Una visión integral que coincide con el enfoque de Galloway (2022) al abordar los ecosistemas forestales como sistemas sociales y ecológicos complejos, donde las iniciativas de desarrollo y conservación dependen críticamente de la interdependencia entre las dinámicas biofísicas de las especies y las realidades socioeconómicas del territorio.

Escasez de materia prima y pérdida de una base productiva territorial

La cadena artesanal de Ibarra y, particularmente, de San Antonio de Ibarra evidencia una dimensión adicional del problema. La información obtenida en el marco del Programa de Investigación *Juglans* y del estudio de Eraso et al. (2026) muestra que la disponibilidad de madera de nogal para carpinteros, mueblistas, talladores y otros artesanos se ha reducido considerablemente. En la práctica, **la escasez de materia prima ya ha obligado a recurrir a otras especies maderables**, entre ellas cedro y diversas maderas nativas e introducidas, aunque algunas de estas alternativas presentan también restricciones de disponibilidad.

Esta situación constituye una manifestación concreta de la paradoja del valor analizada anteriormente. La elevada apreciación de la madera de nogal favoreció históricamente su aprovechamiento y utilización artesanal, pero la insuficiente reposición

del recurso y la reducción progresiva de las fuentes de abastecimiento han terminado comprometiendo la propia continuidad de la cadena que dependía de esa materia prima. De este modo, la pérdida del recurso forestal se convierte también en un problema productivo y territorial: no desaparecen solamente árboles, sino que se reduce la disponibilidad de una materia prima vinculada con conocimientos, oficios y actividades económicas desarrolladas históricamente alrededor de ella.

Esta profunda interdependencia entre el recurso forestal y la matriz productiva local es respaldada por Álvarez et al. (2023), quienes demuestran que la producción artesanal de tallados en madera constituye el motor fundamental del desarrollo socioeconómico y de la identidad cultural de San Antonio de Ibarra. Su investigación advierte que la contracción en la cadena de valor debido a la escasez de materias primas tradicionales no solo debilita los ingresos familiares y el empleo local, sino que amenaza directamente la preservación del patrimonio cultural inmaterial de la región.

La búsqueda de alternativas maderables constituye una respuesta a esta restricción. Un ejemplo es el trabajo de Ruiz (2020), quien evaluó las propiedades físicas, mecánicas y de trabajabilidad de *Fraxinus americana*, proveniente de una plantación de la Estación Experimental La Favorita, con el propósito de determinar sus posibles usos. La investigación incluyó ensayos de tallado realizados directamente en un taller artesanal de San Antonio de Ibarra con participación de un artesano de amplia experiencia.

Los resultados mostraron un comportamiento favorable del fresno en varios procesos de transformación y permitieron identificar posibilidades de uso en carpintería, mueblería, artesanías y otros productos. La tesis concluyó que la madera podía emplearse, entre otros usos, en mueblería y carpintería general, y recomendó promover su utilización a partir de la experiencia obtenida con el artesano tallador de San Antonio de Ibarra. El propio planteamiento del estudio señalaba la necesidad de generar información que contribuyera a reducir la presión de la industria secundaria y terciaria sobre especies nativas.

El caso de *F. americana* no implica que esta especie constituya un sustituto equivalente del nogal ni que haya reemplazado sistemáticamente su utilización. Más bien, constituye **un ejemplo de la búsqueda y evaluación técnica de alternativas maderables** frente a la necesidad de diversificar las fuentes de materia prima disponibles para actividades de transformación y artesanía. Esta distinción es importante porque la sustitución de una madera no depende únicamente de su disponibilidad, sino también de propiedades físicas y mecánicas, trabajabilidad, comportamiento en tallado y acabado, características estéticas, costos y aceptación por parte de los usuarios.

Ante este escenario de escasez y la consecuente presión del mercado secundario, la protección de la cadena de valor de *J. neotropica* exige también fortalecer los mecanismos de gobernanza forestal y control forense frente a la tala ilegal. Al respecto, Paredes Rodríguez et al. (2026) desarrollaron un marco tecnológico basado en la Xiloteca del Laboratorio de Anatomía de Madera de la Universidad Técnica del Norte (LAMX), integrando la caracterización anatómica del nogal andino con modelos de inteligencia artificial de visión computacional. Mediante el uso de redes neuronales convolucionales implementadas en la aplicación móvil *"Wood Identifier UTN"*, el sistema alcanzó una precisión del 94,04 % en la discriminación taxonómica macroscópica de maderas de alto

valor en los centros de acopio de Ibarra. Este enfoque de monitoreo digital en tiempo real demuestra que la biometría y la tecnología forense son herramientas viables para asegurar la trazabilidad del recurso, combatir el comercio ilegal de germoplasma y salvaguardar el patrimonio forestal andino

Valor Económico Total y costo de sustitución

Esta problemática permite ampliar la interpretación económica mediante el enfoque de **Valor Económico Total (VET)**. La escasez de madera de nogal permite reconocer también un **costo de sustitución o reemplazo**, no obstante, los ingresos obtenidos por madera y nueces, así como las valoraciones monetarias del arbolado urbano presentadas en este capítulo, representan solamente algunas expresiones del valor de *J. neotropica*. El VET comprende una visión más amplia, que reconoce valores asociados con usos directos e indirectos, posibilidades de utilización futura y beneficios vinculados con la permanencia del recurso.

Dentro de esta perspectiva, la provisión de servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, la conservación del suelo y el almacenamiento de carbono representa un valor de uso indirecto que, bajo el enfoque de Farley y Costanza (2010), requiere mecanismos de compensación económica como los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) para internalizar dichos beneficios y corregir las fallas del mercado que incentivan la deforestación. Cuando una materia prima deja de estar disponible, quienes dependían de ella deben recurrir a otros recursos capaces de cumplir funciones semejantes. En la cadena artesanal de San Antonio de Ibarra este proceso implica buscar y utilizar otras maderas y, eventualmente, modificar prácticas de transformación, acabados, diseños o procesos productivos.

El costo de sustitución no corresponde simplemente a la diferencia entre el precio por metro cúbico de nogal y el de otra especie. Una estimación rigurosa tendría que considerar también la cantidad de material requerida para obtener productos equivalentes, rendimiento durante la transformación, desperdicios, costos de secado y mecanizado, comportamiento durante el tallado, necesidades de acabado, durabilidad, calidad final y disponibilidad de la materia prima. Por esta razón, **el presente estudio reconoce la existencia de esta dimensión económica, pero no asigna un valor monetario específico al costo de sustitución**.

La relevancia del concepto reside en mostrar que la pérdida de *J. neotropica* puede generar costos que no aparecen en el precio corriente de la madera. La búsqueda, evaluación y adopción de recursos alternativos constituye en sí misma una señal de que la reducción de la oferta del recurso original genera consecuencias económicas para los usuarios de la cadena.

En consecuencia, los valores monetarios estimados en este capítulo para madera, nueces y arbolado urbano deben interpretarse como **componentes parciales del valor económico de *J. neotropica* y no como su Valor Económico Total**. Tampoco los servicios ecosistémicos identificados, pero no monetizados, deben sumarse artificialmente para obtener una cifra global. Una estimación formal del VET requeriría metodologías específicas para cada componente y procedimientos que eviten la doble contabilización.

Esta perspectiva permite, sin embargo, extraer una conclusión importante: conservar y recuperar *J. neotropica* no representa únicamente conservar biodiversidad; implica también mantener opciones productivas futuras y reducir los costos económicos y sociales derivados de la pérdida de una materia prima vinculada con cadenas productivas territoriales.

Cadenas de valor vinculadas con los territorios

Las experiencias documentadas en Imbabura muestran que las cadenas de valor del nogal se encuentran estrechamente relacionadas con los espacios donde operan sus actores. Propietarios de árboles, productores, recolectores, procesadores de nueces, comerciantes, carpinteros, mueblistas y artesanos participan en diferentes etapas y capturan distintas proporciones del valor generado.

El fortalecimiento de estas cadenas debería orientarse no solamente a incrementar el precio final de los productos, sino también a **mejorar la trazabilidad, la transformación local, la articulación entre actores y la distribución del valor**, generando incentivos para quienes establecen, mantienen y manejan los árboles durante períodos prolongados. En este sentido, la producción forestal y la transformación local pueden contribuir al desarrollo territorial cuando una parte significativa del valor agregado permanece en los lugares donde el recurso es cultivado, manejado y conservado.

La cadena de las nueces ofrece una posibilidad complementaria porque permite generar valor sin eliminar el individuo. Su procesamiento local, junto con otros usos documentados —como los colorantes naturales y diferentes aplicaciones artesanales—, amplía las posibilidades de diversificación. No obstante, como se analizó en el apartado de economía circular, la multiplicidad de usos no garantiza por sí misma sostenibilidad: cada alternativa requiere comprobar la disponibilidad de materia prima, su viabilidad económica y su desempeño ambiental.

Restauración productiva y soluciones basadas en la naturaleza

La capacidad de *J. neotropica* para integrarse en sistemas agroforestales, plantaciones y otras intervenciones de restauración ofrece oportunidades para combinar objetivos ecológicos y productivos. En estos contextos, la especie puede contribuir a recuperar cobertura y estructura arbórea al tiempo que genera productos capaces de favorecer la permanencia del sistema establecido.

Estas intervenciones pueden formar parte de estrategias de **restauración productiva** y, cuando el diseño, implementación y seguimiento cumplan los criterios correspondientes, integrarse en enfoques de **Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)**. Esta precisión es necesaria: *J. neotropica*, considerada aisladamente, no constituye una SbN. La especie puede ser un componente de una intervención orientada a responder simultáneamente a desafíos ambientales y sociales, manteniendo beneficios para la biodiversidad y el bienestar humano.

Desde esta perspectiva, el aporte de *J. neotropica* radica principalmente en su posibilidad de participar en **sistemas multifuncionales** en los que producción, restauración, conservación y medios de vida puedan articularse territorialmente.

Investigación, manejo y decisiones futuras

La información sintetizada en esta obra también evidencia vacíos que deben orientar futuras investigaciones. Los rendimientos de frutos y madera, costos, precios y resultados ambientales disponibles proceden todavía de un número limitado de localidades y estudios de caso. Es necesario ampliar las evaluaciones a diferentes condiciones ecológicas y sistemas de manejo, fortalecer los ensayos de procedencias y progenies, disponer de series de crecimiento de mayor duración y profundizar en el estudio de cadenas de valor y mercados.

En el ámbito económico, será necesario evaluar diferentes densidades, turnos, intensidades de manejo, productividades y escenarios de mercado. Particular interés tendría cuantificar el **costo efectivo de sustitución de la madera de nogal** en cadenas artesanales, comparando especies alternativas no únicamente por precio, sino también por rendimiento industrial, propiedades tecnológicas y costos de transformación.

Asimismo, el desarrollo de cadenas de productos no madereros requiere mayor información sobre productividad, variación temporal, calidad, costos de procesamiento, demanda y posibilidades reales de ampliación del mercado. En el componente ambiental son necesarias evaluaciones con unidades funcionales, límites del sistema y metodologías homogéneas que permitan comparar sistemas productivos y tecnologías.

La investigación futura deberá mantener una relación estrecha con el manejo. Generar conocimiento adquiere mayor relevancia cuando permite mejorar decisiones sobre **qué material propagar, dónde establecerlo, cómo manejarlo, cuándo aprovecharlo y qué individuos o poblaciones conservar**. La articulación entre universidades, productores, comunidades, instituciones públicas, artesanos y demás actores de las cadenas de valor resulta esencial para transformar experiencias locales en estrategias de mayor alcance.

Una perspectiva integrada para *J. neotropica*

La evidencia reunida a lo largo de esta obra muestra que *J. neotropica* no puede comprenderse únicamente como una especie maderable, ni su conservación puede reducirse a impedir su aprovechamiento. Su historia y cultura, diversidad genética, botánica, ecología, fenología, semillas, propagación, establecimiento, manejo silvicultural, integración en sistemas agroforestales, productos madereros y no madereros, servicios ecosistémicos y diferentes expresiones de valor económico conforman un **sistema socioecológico** en el que las decisiones humanas y los procesos biológicos están estrechamente relacionados.

Esta perspectiva permite comprender una contradicción que atraviesa la historia reciente de la especie: **su valor puede constituir simultáneamente una oportunidad y una amenaza**. Puede incentivar el establecimiento, manejo y permanencia de los árboles cuando existen alternativas productivas de largo plazo; pero también puede favorecer su aprovechamiento prematuro cuando predominan necesidades inmediatas, mercados informales, escasa reposición del recurso o mecanismos insuficientes de gobernanza. La actual escasez de madera para algunas de las actividades artesanales que históricamente la utilizaron constituye una expresión concreta de esta contradicción.

La conservación productiva busca actuar precisamente sobre esta relación, procurando que el valor generado por *J. neotropica* contribuya a mantener y renovar la base natural y cultivada de la cual depende. Esto implica conservar poblaciones y recursos genéticos, pero también **producir nuevos árboles**, manejar técnicamente las plantaciones y sistemas agroforestales, prolongar la permanencia de individuos productivos y desarrollar cadenas de valor capaces de recompensar el manejo sostenible.

El desafío hacia el futuro consiste, por tanto, en transformar el conocimiento acumulado en **poblaciones conservadas, árboles establecidos y manejados, recursos genéticos resguardados, cadenas de valor responsables y paisajes andinos más diversos y funcionales**. Recuperar la disponibilidad futura de madera de nogal requerirá décadas, precisamente por la naturaleza biológica de la producción forestal; por ello, las decisiones de establecimiento, conservación y manejo adoptadas en el presente determinarán las opciones productivas y ecológicas disponibles para las próximas generaciones.

En este marco, *J. neotropica* representa más que un recurso forestal de valor comercial. Constituye una especie cuya conservación depende de la capacidad de **articular conocimiento científico, saberes locales, manejo forestal y oportunidades económicas**. La experiencia acumulada en Ecuador muestra tanto las posibilidades de esa articulación como las consecuencias de no renovar oportunamente el recurso. Convertir este conocimiento en una estrategia sostenida de conservación productiva será determinante para que el nogal andino continúe formando parte de los bosques, sistemas productivos, actividades culturales y paisajes de los Andes ecuatorianos.

Referencias

Abad, J. (2016). Manejo del arbolado urbano y sus desafíos estructurales en ciudades andinas. *Revista de Gestión Ambiental Urbana*, *4*(2), 21–33.

Abad, M., Noguera, P., & Burés, S. (2001). National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: Case study in Spain. *Bioresource Technology, 77*(2), 197–200.

Acosta-Solís, M. (1961). *Los bosques del Ecuador y sus productos*.

Aerts, R. (1996). Nutrient resorption from senescing leaves of perennials. *Ecology*, *77*(1), 26–46. doi.org

Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology.* (5th ed.). Elsevier Academic Press.

Aguinaga del Hierro, C. A. (2021). *Restauración de platos tradicionales de la ciudad de Ibarra de finales del siglo XIX hasta mediados del siglo XX* [Tesis de maestría, Universidad Técnica del Norte].

Aguirre, N., Añazco, M., Cueva, K., Ordóñez, L., Pekkarinen, A., Ramírez, C., Román, R. M., Sánchez, G., & Velasco, C. (Comps.). (2010). *Metodología para desarrollar el estudio piloto de la Evaluación Nacional Forestal, en conformidad con el mecanismo REDD+*. Ministerio del Ambiente del Ecuador; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; Programa UN-REDD

Aguirre, N., Mogrovejo, P., Ordóñez, L., & Hofstede, R. (2001). *Identificación y selección de fuentes semilleras de especies forestales nativas en los bosques andinos del Ecuador*. Proyecto EcoPar. Quito, Ecuador.

Aguirre, Z. & Geada-López, G. (2017). Estado de conservación de los bosques secos de la provincia de Loja, Ecuador. *Arnaldoa*, *24*(1), 207-228-

Aguirre, Z., Reyes, B., Pinza, D., Medina, A., Díaz, E., & Quizhpe, W. (2019). Procesos ecológicos de la vegetación del bosque andino del Parque Universitario "Francisco Vivar Castro", Universidad Nacional de Loja. En M. E. Encalada Córdova, Z. H. Aguirre Mendoza, E. V. Alvarado Jaramillo, & K. A. Pucha Cofrep (Eds.), *Libro de memorias del I Simposio de Investigación Científica,* (pp. 92–105). Universidad Nacional de Loja.

Albán Gordillo, G. E. (2015*). Extracción mecánica y nanoencapsulación del aceite de Juglans neotropica mediante spray-drying.* [Trabajo de titulación de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Albán, M. (2015). *Historia y tradición de las nogadas de Ibarra*. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Ibarra.

Alberca Jaramillo, N. V. (2014). *Análisis de la efectividad de cinco microsatélites para detectar la diversidad genética de Juglans neotropica*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador].

Aldas, P., Betancourt, D., Parra, N. & Guaman, C. (2025). Tintura artesanal y técnicas ancestrales del pueblo Salasaka. *PENTACIENCIAS, 7*(4), 114-124.

Almeida, A., Galeano, G., & Bernal, R. (2015). *Useful plants of the Andes: A regional synthesis*. Universidad Nacional de Colombia.

Almeida, P. (2020). *Efecto del sustrato enriquecido con trichoderma spp. más citoquininas, en cinco métodos de escarificación en semillas de nogal* (*Juglans neotrópica* Diels). [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Altieri, M. A., y Nicholls, C. I. (2004). *Biodiversity and pest management in agroecosystems.* (2nd ed.). Haworth Press.

Aluja, M., & Mangan, R. L. (2008). Fruit fly (Diptera: Tephritidae) host status determination: Critical conceptual, methodological, and regulatory considerations. *Annual Review of Entomology, 53*, 473–502. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.53.103106.09335

Alvarado, J. (2021*). Determinación de las propiedades físicas y químicas de la madera de cinco especies forestales procedentes de la parroquia Multitud, cantón Alausí, provincia de Chimborazo*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Alvarez, J. (2025). *Evaluación del crecimiento inicial de tres variedades de Coffea arabica L. bajo sistemas agroforestales en la provincia de Imbabura, Ecuador.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Alvarez Jaramillo, B. E. (2017). *Análisis de omega-3 y omega-6 en quinua (Chenopodium quinoa), chía (Salvia hispánica L.) y tocte (Juglans nigra L.) por cromatografía y su aplicación en una barra nutricional*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte, Ecuador].

Álvarez, S., Torres, O. & Cuarán, M. (2023). El impacto de la producción artesanal de tallados en madera en el desarrollo local de San Antonio de Ibarra. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, *11*(1), Artículo 97.

Álvarez Valencia, D. A. (2014). *Las especies vegetales promisorias: Caso del departamento de Antioquia*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Colombia].

Americas Regional Workshop (Conservation & Sustainable Management of Trees, Costa Rica, November 1996). (1998). *Juglans neotropica*. *The IUCN Red List of Threatened Species 1998.* e.T32078A9672729. https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.1998.RLTS.T32078A9672729.en

Andrade Chala, Z. Y., & Torres Minotta, L. N. (2025). *Evaluación de tratamientos pregerminativos de cedro negro (Juglans neotropica) en Santa María, Huila*. [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/77142

Añazco, M. (1996). *El aliso (Alnus acuminata).* Proyecto Desarrollo Forestal Campesino en los Andes del Ecuador (DFC)

Añazco, M., Espinosa, A., Chagna, E., Guachamín, V., Ramírez, J., Ocampo, L., & Vizcaíno, M. (2019*).* Especies forestales y su aporte a la mitigación del cambio climático en los Andes del Ecuador. En L. Vera (Ed.), *Ciencias ambientales: Base para la sostenibilidad,* (pp. 59–68). Memorias del I Congreso Internacional de Ciencias Ambientales. Pasto, Colombia.

Añazco Romero, M. J. (2021). *Programa de Investigación Juglans* [Programa de investigación]. Carrera de Ingeniería Forestal, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte.

Añazco Romero, M. J., Vallejos Álvarez, H. V., & Erazo García, N. M. (2024). *Aliso de Nepal Alnus nepalensis D. Don. en el Ecuador: Ecología-silvicultura-economía*. Editorial CIDE.

Añazco Romero, M., & Rojas, S. (2015a). *Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la especie Guadua angustifolia*. Red Internacional de Bambú y Ratán (INBAR).

Añazco Romero, M., & Rojas, S. (2015b). *Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú (Guadua angustifolia) en Perú*. Red Internacional de Bambú y Ratán (INBAR).

Añazco-Romero & Fernández-Gómez. (2021). Fijación de carbono en sistemas agroforestales gestionados por pequeños productores en los Andes del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, *11*(2), 32-42.

Aradhya, M. K., Potter, D., Gao, F., & Simon, C. J. (2007). Molecular phylogeny of *Juglans* (Juglandaceae): A biogeographic perspective. *Tree Genetics and Genomes*, *3*(4), 363– 378. https://doi.org/10.1007/s11295-006-0078-5

Aranda-Ventura, J., Villacrés Vallejo, J., García-de Sotero, D., Sotero Solís, V., Vásquez Torres, D., Monteiro Temmerman, U., González-Aspajo, G., Mego Bardales, R., & Vigo Alfaro, W. (2016). Actividad antioxidante in vitro y antidiabética in vitro e in vivo del extracto de *Juglans neotropica* Diels (nogal peruano). *Revista Peruana de Medicina Integrativa*, *1*(4), 16–24.

Armijos, A. A., & Sinche, M. G. (2013). *Distribución y propagación asexual de cuatro especies forestales nativas en vivero utilizando dos tipos de sustratos, en la Hoya de Loja*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja, Ecuador].

Armijos-Montaño, A., Alvarado-Chamba, J., Quito-Torres, J., León-González, T., Guamán-Guamán, L., & Pucha-Cofrep, D. (2017). Anatomía de la madera de diez especies forestales de bosque andino del sur del Ecuador. *CEDAMAZ, 7(1).* https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/375

Asamblea Nacional del Ecuador. (2011). *Parroquia de San Antonio de Ibarra, reconocida como Patrimonio Cultural y Artístico del Ecuador*.

Assmann, E. (1970). *The principles of forest yield study: studies in the organic production, structure, increment, and yield of forest stands*. Pergamon Press.

Avery, T. E., & Burkhart, H. E. (2002). *Forest measurements.* (5th ed.). McGraw-Hill.

Avery, T. E., & Burkhart, H. E. (2015). *Forest Measurements.* (5.ª ed.). Waveland Press

Ávila, M. (2024). *Influencia de la fertilización en Juglans neotropica* Diels *plantado en estepa espinosa montano bajo, estación experimental Tunshi ESPOCH.* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Ayala, K., & Torres, K. (2025). *Evaluación de sostenibilidad de tres sistemas agro silvícolas asociadas con Coffea arabica y calidad de café, en la provincia de Imbabura* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Ayala Mora, E. (2020). *Patrimonio cultural de Imbabura*. Fundación Cultural Enrique Ayala Pasquel.

Azas, R. (2016). *Evaluación del efecto de los tratamientos pregerminativos en semillas de nogal (Juglans neotrópica* Diels*) en el recinto Pumin provincia de Bolívar*. [Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas].

Banco Central del Ecuador. (2025). *Tasas de interés vigentes*: *Diciembre 2025.*

Barreto Avila, G., Herrera, J. D., & Trujillo Navarrete, E. (1990). *Juglans neotropica* (Investigaciones Forestales No. 40). Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente (INDERENA), Subgerencia de Bosques, Estación Forestal La Florida, Colombia.

Barrionuevo, J. & Ramírez, G. (2025). Saberes ancestrales en riesgo: revisión sistemática sobre las causas y consecuencias de su pérdida en comunidades indígenas amazónicas del Ecuador. *Polo del conocimiento*, *10*(9), 449-464.

Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). *Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination* (2nd ed.). Academic Press.

Beer, J., Harvey, C. A., Ibrahim, M., Harmand, J. M., Somarriba, E., & Jiménez, F. (2003). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas, 10*(37–38), 80–87.

Benítez Cuenca, C. E., & Villena Morante, K. S. (2024). *Optimización de la actividad antimicrobiana frente a Pseudomona aeruginosa mediante diseño de mezclas de extractos de tres especies vegetales*. [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil, Ecuador].

Berjak, P., & Pammenter, N. W. (2008). From Avicennia to Zizania: seed recalcitrance in perspective. *Annals of Botany*, *101*(2), 213–228.https://doi.org/10.1093/aob/mcm168

Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). *Seeds: Physiology of development, germination and dormancy* (3rd ed.). Springer.

Bonner, F. T. (2008). *Seed biology and technology of forest trees* (General Technical Report SRS-GTR-113). USDA Forest Service.

Bonner, F. T., Karrfalt, R. P., & Nisley, R. G. (2008). *The woody plant seed manual*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

Borja Zhicay, M. D., & Quituisaca Barros, S. M. (2020). *Elaboración de harina, esencia y pasta de tocte para la aplicación en recetas de postres de innovación*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, Ecuador].

Bravo, I. & Tabango, E. (2023). *Análisis de identidad cultural histórica artística de la parroquia San Antonio de Ibarra para su integración en el desarrollo turístico*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Burkhart, H. E., & Tomé, M. (2012). Modeling forest trees and stands. Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9

Bussmann, R. W., & Sharon, D. (2006). Traditional medicinal plant use in Northern Peru: Tracking two thousand years of healing culture. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 2*, 47.

Caballero-Serrano, V., McLaren, B. E., Carrasco, J. C., Alday, J. G., Fiallos, L., Amigo, J., & Onaindia, M. (2019). Traditional ecological knowledge and medicinal plant diversity in Ecuadorian Amazon home gardens. *Global Ecology and Conservation*, *17*, e00524.

CABI. (2019). *Juglans neotropica* (Andean walnut). En *Forestry Compendium*. Centre for Agriculture and Bioscience International.

CABI. (2022). *Juglans neotropica* (Andean walnut). *In Invasive Species Compendium***.** Centre for Agriculture and Bioscience International.

Cabrera Malla, N. X. (2024). *Influencia del sitio en la estructura anatómica de la madera de 10 especies forestales en la ciudad de Loja* [Trabajo de Integración Curricular de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Cabrera, R. I. (1999). Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, *5*(1), 5–11. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1998.03.025

Cachimuel Muñoz, D. (2024). *Cálculo de la huella ecológica de madera en el campus Yuyucocha.* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica del Norte].

Campoverde Villalta, B. C., & Pañi Largo, N. E. (2022). *Aplicación de técnicas de repostería para el desarrollo de recetas de autor con base en sucedáneos de leche, queso y mantequilla de tocte (Juglans neotrópica).* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, Ecuador].

CARE Ecuador. (1991). *Evaluación formativa: Proyecto PROMUSTA PN 38*.

Carlson, P. J., & Añazco R., M. (1990). *Establecimiento y manejo de prácticas agroforestales en la Sierra ecuatoriana.* Red Agro-Forestal Ecuatoriana.

Cartuche, K. (2022). *Caracterización de la madera de 95 especies forestales del sur de Ecuador con base a sus propiedades físicas, organolépticas y anatómicas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Carvajal Benavides, J. G., Sono Toledo, D. D., Arcos Unigarro, C. R., Basantes Vizcaíno, T. F., Paredes Rodríguez, H. O., & Varela Jácome, G. D. (2023a). Caracterización de las propiedades organolépticas y anatómicas de *Juglans neotropica* Diels (nogal) en la provincia de Imbabura. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria Pentaciencias, 5*(6), 647–659.3.

Carvajal Benavides, J. G., Sono Toledo, D. D., López Narváez, A. L., Layana Bajaña, E. M., & Chagna Ávila, E. J. (2023b). Evaluación y análisis del factor de forma de *Juglans neotropica* Diels en el predio de Yuyucocha, cantón Ibarra. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(2), 10243–10262

Castillo, J. G., & Zhangallimbay, D. (2021). La tasa social de descuento en la evaluación de proyectos de inversión: Una aplicación para el Ecuador. *Revista de la CEPAL*, *134*, 77–98.

Cavelier, J., Lizcano, D., & Jaramillo, M. A. (1998). Fenología de dos especies de *Tillandsia* (Bromeliaceae) en un bosque montano alto de la Cordillera Oriental colombiana. *Selbyana*, *19*(1), 44–51.

Cayetano, S. (2018). *Determinación del teñido del tinte cosmético formulado con extracto* del fruto de *Juglans neotropica* Diels *(nogal) en el cabello*, *in vitro*. [Tesis de pregrado, Universidad Alas Peruanas].

Ceballos-Freire, Á. J., & López-Ríos, J. A. (2007). Conservación de la calidad de semillas forestales nativas en almacenamiento. *Cenicafé, 58*, 265–292

Chagna Ávila, E. J., Vizcaíno Pantoja, M. I., Cue García, J. L., & Paredes Rodríguez, H. O. (2018). Almacenamiento de carbono del componente forestal en la Granja Yuyucocha, Ibarra, Ecuador. En *Memorias del VI Congreso de la Red Ecuatoriana de Universidades y Escuelas Politécnicas para la Investigación y Posgrados (REDU),* (pp. 1150–1159). Editorial UTN.

Changoluisa, M. (2024). *Determinación de la composición y estructura del arbolado urbano de la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo.* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Chimbolema, C. (2021). *Evaluación de tres tipos de injerto de nuez (Juglans regia l.) en cuatro progenies de nogal (Juglans neotrópica* Diels.*) en la estación experimental Tunshi*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Chusquillo, L. (2014). *Diseño de un proceso para la obtención de compuestos fenólicos del pericarpio de la semilla del nogal Juglans neotropica Diels y extracción del aceite de la nuez*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional].

CIDAP. (2016). *Árboles patrimoniales de Cuenca*. Centro Interamericano de Artesanías y Artes Populares.

Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). *Timber management: A quantitative approach*. John Wiley & Sons.

Contento Minga, L. E. (2012). *Memoria, saberes y usos sociales de los huertos en las edificaciones patrimoniales del Azuay*. Instituto Nacional de Patrimonio Cultural.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., … van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, *387*, 253–260.

Cué-García, J. L., Ramírez-López, J.-L., & Chagna Ávila, E. J. (2024). Tratamientos pregerminativos y diferentes sustratos en la germinación de semillas de *Juglans neotropica* Diels, Ecuador. *Ciência Florestal, 34*, e83757. https://doi.org/10.5902/19805098683757

Cuellar Tuquerrez, M. S. (2026). *Distribución espacial potencial de Juglans neotropica* Diels *en la provincia de Imbabura* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Cuenca Pérez, D. E. (2024). *Obtención de biocarbón magnético impregnado con nanopartículas de hierro a partir de residuos orgánicos de tocte (Juglans neotropica) y aguacate (Persea americana)*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo , Ecuador].

Cueva, A. (2018). *Estimación del turno biológico de corta para Juglans neotropica* Diels *a través de métodos dendrocronológicos en dos ecosistemas forestales andinos de la provincia de Loja*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Cunduri Mayorga, M. J. (2026). *Determinación de la durabilidad natural de la albura y duramen de Juglans neotropica y Pouteria caimito en el Campus Yuyucocha* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Daniel, T. W., Helms, J. A., & Baker, F. S. (1979). *Principles of silviculture* (2nd ed.). McGraw-Hill.

De la Torre, L., Navarrete, H., Muriel, P., Macía, M. J., & Balslev, H. (2008). *Enciclopedia de las plantas útiles del Ecuador*. Herbario QCA y Herbario AAU.

Deepika, Sharma, S., Kumar, P., Verma, P., & Vahdati, K. (2026). Integrative advances in walnut (*Juglans* spp.) micropropagation: overcoming recalcitrance through physiological, biochemical, and translational innovations. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, *164,* 47.

Delgado, R. & Torres, R. (1995). *Identificación y control de la pudrición radicular del nogal Juglans neotropica* Diels*, con la aplicación de productos orgánicos e inorgánicos*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Desarrollo Forestal Campesino en los Andes del Ecuador. (1998). *Hacia un manejo sostenido del bosque nativo de nogal: Un trabajo conjunto de la comunidad del Tundo, en la búsqueda de alternativas sustentables*. Quito, Ecuador.

Díaz, C. & Vilema, G. (2023). *Determinación de características fenológicas de Juglans neotropica* Diels *en cuatro formaciones vegetales, Imbabura*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Díaz Ramírez, A. E. (2019). *Identificación, aspectos morfológicos y fenológicos de las especies forestales nativas en el valle de Cajamarca.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca].

Diels, L. (1906). Juglandaceae. En A. Engler (Ed.), *Das Pflanzenreich* (IV. 125, pp. 1–34). Wilhelm Engelmann.

Dong, W., Xu, C., Li, W., Xie, X., Lu, Y., Liu, Y., Jin, X., & Suo, Z. (2017). Phylogenetic resolution in *Juglans* based on complete chloroplast genomes and nuclear DNA sequences. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1148.https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01148

Duryea, M. L., & Landis, T. D. (1984). *Forest nursery manual: Production of bareroot seedlings*. Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers.

Ecuador Forestal. (2010). *Ficha técnica No. 2: Nogal* (*Juglans neotropica*).

Egües Nicoletti, A. A. (2021). *Caracterización anatómica de la madera y dendrocronología de Juglans neotropica* Diels *de áreas ribereñas de la provincia de Chachapoyas, Amazonas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú].

Enescu, C. M., Mihalache, M., Ilie, L., Dinca, L., Constandache, C., & Murariu, G. (2025). Agricultural benefits of shelterbelts and windbreaks: A bibliometric analysis. *Agriculture*, *15*, 1204.

Enríquez Santana, J. A., Carvajal Benavides, J. G., Yépez Duque, E. S., Valencia Valenzuela, X. G., & Flores Ruiz, J. A. (2023). Evaluación de la capacidad de carga turística, como base del manejo sostenible para el campus Yuyucocha de la Universidad Técnica del Norte. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(1), 4066–4089.

Eraso Terán, O. H., Varela Jacome, G. D., Añazco Romero, M. J., & Vallejos Álvarez, H. V. (2026). Socio-Ecological Barriers to the Sustainable Management of the Andean Walnut (*Juglans neotropica*) and the Value Paradox in the Ecuadorian Andes: A Case Study from Imbabura Province, Ecuador. *Conservation*, *6*, 52.

Erazo Bilbao, D. J. (2012). *Estudio e investigación del tocte, producción, explotación, análisis de sus propiedades y aplicación en la gastronomía ecuatoriana.* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica Equinoccial , Ecuador].

Esparza, B. (2023). *Propagación sexual de Juglans neotropica* Diels. *con tratamientos pregerminativos físicos y químicos*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Espinosa, J., Moreno, J., & Bernal, G. (Eds.). (2022). *Suelos del Ecuador: Clasificación, uso y manejo*. Instituto Geográfico Militar (IGM).

Estrada, K. (2023). *Identificación y selección de árboles semilleros de Juglans neotropica* Diels *en Imbabura y Napo, Ecuador.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Estrada, W. (1997). *Manual para la producción de nogal (Juglans neotropica* Diels*)*. Corporación de Desarrollo Forestal y Maderero del Ecuador (CORMADERA); Editorial EDI-U.

Estrella, E. (1990). *El pan de América: Etnohistoria de los alimentos aborígenes en el Ecuador* (3.ª ed.). Ediciones Abya-Yala.

Estrella López, J. J., Gualán, L., Chalán, C., & Estrella, J. (2020). *Nuestras semillas, nuestra vida* (2.ª ed.). Grupo de Apoyo al Movimiento de Mujeres del Azuay (GAMMA); Chaski Warmikuna; Centro de Encuentro con la Naturaleza y Terapia Social (CEN), con apoyo de Fundación Rosa Luxemburg. Cuenca, Ecuador.

Evans, J., & Turnbull, J. W. (2004). *Plantation forestry in the tropics: the role, silviculture, and use of planted forests for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes.* (3.ª ed.). Oxford University Press.

Faith, D. P. (1992). Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, *61*(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/0006-3207(92)91201-3

FAO. (2004). *Apoyo al desarrollo forestal comunal en los Andes del Ecuador: Resultados y recomendaciones del proyecto* (RLC/GCP/ECU/070/NET, informe terminal).

FAO. (2011). *Guide for integrated pest management in forest nurseries*. Food and Agriculture Organization of the United Nations

FAO. (2014). *Plantaciones forestales y restauración del paisaje forestal*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.

FAO. (2017). *Soil organic carbon: The hidden potential*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.

FAO. (2018). *Agroforestry for landscape restoration.* FAO. Rome.

FAO. (2020). *Non-wood forest products for sustainable livelihoods*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.

FAO. (2021). *The state of the world's forest genetic resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Farley, J., & Costanza, R. (2010). Payments for ecosystem services: From local to global. *Ecological Economics*, *69*(11), 2060–2068.

Fernández, P., Lozano, D., Armijos-Montaño, A., Jumbo, N., & Pucha, D. (2026). Evaluación sintomatológica del estado fitosanitario del arbolado urbano de la ciudad de Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, *16*(1), 67–89.

Fierro, M. (2023). *Caracterización dasométrica de familias Juglans neotropica* Diels *recolectadas en la provincia de Tungurahua*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Figueroa Chele, D. J., & Freire Villamar, K. M. (2019). *Investigación y aplicación de la pasta de tocte o Juglans neotrópica en salsas frías y calientes*. [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil, Ecuador].

Finegan, B. (1992). The management potential of neotropical secondary lowland rain forest. *Forest Ecology and Management*, *47*(1–4), 295–321.

Flores, B. (2021). *Caracterización del pigmento presente en el pericarpio del fruto del nogal (nogalina) como tintura orgánico*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Flores, P., Poggi, D., García, S., Catraro, M. & Gariglio, N. (2018). Descripción de patrones normales y anormales de plántulas de *Juglans nigra*. *FAVE - Ciencias Agrarias,17* (2), 7-21

Fonseca, D. (2023). *Determinación de tratamientos pregerminativos químicos de semillas de Juglans neotropica* Diels *proveniente de la parroquia San Blas, cantón Urcuquí, provincia de Imbabura*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Fonseca, D. et al. (2023). Análisis de tratamientos pregerminativos químicos en semillas de *Juglans Neotropica* Diels de procedencia de San Blas, Cantón Urcuquí, Imbabura-Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(2):8428-8841.

Fonteyne, S., Castillo Caamal, J. B., Lopez-Ridaura, S., Van Loon, J., Espidio Balbuena, J., Osorio Alcalá, L., Martínez Hernández, F., Odjo, S., & Verhulst, N. (2023). Review of agronomic research on the milpa, the traditional polyculture system of Mesoamerica. *Frontiers in Agronomy, 5*, 1115490.

Fuentes Rojas, A. G. (2016). *Caracterización de sistemas agroforestales de la parroquia Cahuasquí, cantón Urcuquí*. [Trabajo de grado, Universidad Técnica del Norte].

GAD Parroquial San Antonio de Ibarra. (2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2019 - 2023*.

Galloway, G. (1987). Criterios y estrategias para el manejo de plantaciones forestales en la Sierra ecuatoriana. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Dirección Nacional Forestal, Proyecto DINAF/AID.

Galloway, G. (2022). Forests as complex systems: Implications for forest-based development initiatives. En P. J. Baker, D. R. Larsen & A. Saxena (Eds.), *Forests as Complex Social and Ecological Systems*: *A Festschrift for Chadwick D. Oliver* (pp. 253-273). Springer. doi.org

Galloway, G. (Ed. téc.). (1993). *Manejo de plantaciones forestales: guía técnica para el extensionista forestal* (Serie técnica. Manual técnico N.º 7). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

Galloway, G., Ugalde, L., & Vasquez, W. (2001). Importance of density reductions in tropical plantations: Experiences in Central America. *Forests, Trees and Livelihoods, 11*(3), 217–232.

Gara, R. I., & Onore, G. (1989). *Entomología forestal*. Proyecto DINAF-AID.

García, L., & Pereira, J. (2019). La arquitectura de la imagen digital. *ASRI. Arte y Sociedad. Revista de Investigación en Artes y Humanidad digitales,* (17), 122-134.

García, M., & Mena Vásconez, P. (2021). *Biodiversidad y patrimonio natural de Imbabura*. Prefectura de Imbabura.

Gentry, A. H. (1996). *A field guide to the families and genera of woody plants of Northwest South America*. University of Chicago Press.

George, E. F., Hall, M. A., & De Klerk, G. J. (2008). *Plant propagation by tissue culture* (3ra ed.). Springer.

Germain, E. (1997). *Genetic improvement of the Persian walnut (Juglans regia* L.). *Acta Horticulturae*, (442), 21–32. doi.org

Giraldo, C. I., Mera, Y. A., Rivas, S. C., Muñoz, D. G., Acosta, L. M., Pérez-Muñoz, N., Villalba-Malaver, J. C., & Ordóñez-Hoyos, A. E. (2022). Evaluación fitosanitaria de *Juglans neotropica* y *Quercus humboldtii* en arbolado urbano de Popayán-Cauca, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *46*(178).

Goméz, S. (2010). *Reproducción y aclimatación de cuatro especies nativas forestales: Quinua (Polylepis spp), Romerillo (Podocarpus sp), Nogal (Juglans regia), Arrayan (Myrcianthes sp) en el campus Juan Lunardi*. [Tesis de pregrado, Universidad Salesaniana, sede Cuenca].

González Pepinós, E. I. (2018). *Identificación de productos forestales no maderables (PFNM) – tintes vegetales en la zona de Intag, noroccidente del Ecuador.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

González, D. & Ordoñez, M. (2009). *Evaluación de 8 especies forestales plantadas en tres estadios de sucesión vegetal en la estación científica San Francisco, provincia de Zamora Chinchipe.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Gonzalon, A. (2024). *Valoración de interacciones ecológicas del Juglans neotropica* Diels*., en dos ecosistemas de la provincia de Imbabura*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Gordillo, A., Rojas, J., & Pérez, M. (2020). Incidencia de *Fusarium* spp. en semillas forestales tropicales y su efecto sobre la germinación. *Bosque, 41*(1), 75–85. https://doi.org/10.4067/S0717-92002020000100075

Grossnickle, S. C. (2012). Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*, *43*, 711–738. https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6

Grossnickle, S. C., & South, D. B. (2017). Seedling quality assessment to predict field performance. *Forests, 8*(9), 331. https://doi.org/10.3390/f8090331

Guamán Calderón, C. R., & Ipiales Acosta, F. J. (2011). I*nventario de áreas potenciales para forestación y reforestación de la microcuenca del río Blanco de los cantones Mira y Espejo*. [Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte].

Guamán, L. (2023). *Turno biológico de corta de siete especies forestales de Ecuador*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Guambo Tapia, V. S., Valenzuela Erazo, D. A., Saeteros Hernández, A. M., & Noboa Silva, V. F. (2020). Efectos de disoluciones nutritivas de nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K) sobre el crecimiento de plántulas de *Juglans neotropica* Diels. *Ciencia Digital, 4*(1), 236–252.

Guambo, V. (2018). *Efectos de disoluciones nutritivas de nitrógeno, fósforo y potasio (n-p-k) sobre el crecimiento de plántulas de Juglans neotropica Diels*. [Tesis de Maestría, Universidad Estatal Amazónica].

Guanolema, M. (2022). *Evaluación de cinco métodos de escarificación y dos sustratos para la producción de plantas de nogal (Juglans neotropica), en el vivero Guaslán, cantón Riobamba*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Guariguata, M. R. (Ed.). (2013). *Avances y perspectivas del manejo forestal para uso múltiple en el trópico húmedo*. Centro para la Investigación Forestal Internacional.

Guerra, W. (2022). *Tinturado de la fibra de alpaca utilizando diferentes partes de la planta del nogal (corteza, hojas y fruto).* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Guevara, P. & Yepez, J. (2026*). Caracterización de las propiedades edafológicas, dasométricas y fenotípicas de Juglans neotropica* Diels *en cuatro sitios de la zona norte de los Andes del Ecuador.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Gutiérrez, R. (2011). *Efecto antidiarreico del extracto etanólico de las hojas de Juglans neotropica* Diels *"nogal".* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga].

Gutiérrez, R., Torres, J., & Pineda, M. (2018). Variabilidad genética y estrategias de conservación en especies forestales nativas. *Revista Forestal Latinoamericana*, *33*(2), 55–68.

Guzmán, N., Jiménez, M., Minga, D., Martínez, E. & O. Delgado. (2023). *Árboles urbanos de Cuenca, guía de reconocimiento*. Universidad del Azuay.

Haase, D. L. (2008). Understanding forest seedling quality: Measurements and interpretation*. Tree Planters' Notes*, 52(2), 24–30

Haase, D. L., Pike, C., Enebak, S. A., Ma, Z., & Pinto, J. R. (2016). Nursery practices and seedling performance: A review of management impacts on seedling quality. *Reforesta, 1*, 1–23. https://doi.org/10.21750/REFOR.1.01.01

Hallé, F., Oldeman, R. A. A., & Tomlinson, P. B. (1978). *Tropical trees and forests: An architectural analysis*. Springer.

Harper, J. L. (1977). *Population biology of plants*. Academic Press.

Hartmann, H. T., Kester, D. E., Davies, F. T., & Geneve, R. L. (2018). *Plant propagation: Principles and practices* (9th ed.). Pearson Education.

Haug, I., Wubet, T., Weiß, M., Aguirre, N., Weber, M., Günter, S., & Kottke, I. (2010). Species-rich but distinct arbuscular mycorrhizal communities in reforestation plots on degraded pastures and in neighboring pristine tropical mountain rain forest. *Tropical Ecology, 51*(2), 125–148.

Holguín, W., Aguilar, C., Terán, K., Garcés, F., Cabrera, C., & Cevallos, S. (2025). *Documento de bases teóricas de algoritmo (ATBD) MapBiomas Ecuador Colección 3.0: Apéndice Ecuador*. Fundación de Estudios Ecológicos EcoCiencia.

Homeier, J., Breckle, S.W., Günter, S., Rollenbeck, R., & Leuschner, C. (2010). Tree diversity, forest structure and species distribution along elevational and neotropical microclimatic gradients in the tropical Andes. *Biotropica*, *42*(3), 258–271

Hong, T. D., & Ellis, R. H. (1996). *A protocol to determine seed storage behaviour*. IPGRI Technical Bulletin No. 1.

Huachaca Laura, R. (2017). *Actividad gastroprotectora y antisecretora de los compuestos fenólicos aislados de las hojas de Juglans neotropica* Diels *"nogal*". [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga].

Humphries, S., & Holmes, T. P. (2014). *Green Value: A tool for simplified financial analysis of forest-based initiatives*. Earth Innovation Institute & USDA Forest Service.

Humphries, S., & Holmes, T. P. (2015). Financial analysis of community-based forest enterprises with the Green Value tool. In L. Pancel & M. Köhl (Eds.), T*ropical forestry handbook* (2nd ed., pp. 2949–2966). Springer.

Hurtado Manrique, P. E., Jurado Teixeira, B., Ramos Llica, E., & Calixto Cotos, M. R. (2015). Evaluación de la actividad antioxidante del extracto hidroalcohólico estandarizado de hojas de *Juglans neotropica* Diels (nogal peruano). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(3), 283–291.

Hurtado-Trejo, L., Urgiles-Gómez, N., Eras-Guamán, V. H., Muñoz-Chamba, J., Encalada-Córdova, M., & Quichimbo-Saraguro, L. (2020). Aplicabilidad de las Normas ISTA: Análisis de la calidad de semillas en especies forestales en el sur del Ecuador. *Bosques Latitud Cero, 10*(2), 44–57.

Husch, B., Beers, T. W., & Kershaw Jr., J. A. (2003). *Forest Mensuration* **(**4.ª ed.). John Wiley & Sons.

Ibarra Becerra, D. A., & Yajamin Suquillo, M. R. (2026). *Evaluación de dosis de fertilizante 18-46-0 NPK en plantación forestal de Juglans neotropica* Diels *en el Campus La Favorita.* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Inga Guillén, J. G. (2011). *Turno biológico de corta en Juglans neotropica* Diels*, a partir del análisis de anillos de crecimiento en Selva Central del Perú.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2023). *Marco Geoestadístico Nacional 2023* [Conjunto de datos geoespaciales].

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2022). *Marco Geoestadístico Nacional 2022* [Conjunto de datos geoespaciales].

International Seed Testing Association. (2025). *International Rules for Seed Testing 2025*. Bassersdorf, Switzerland.

International Seed Testing Association-ISTA-. (2017). *International rules for seed testing 2017*.

International Seed Testing Association-ISTA-. (2023). *International rules for seed testing 2023*.

Instituto Geográfico Militar. (2022). *Suelos del Ecuador*: *Clasificación, uso y manejo.* IGM. https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/estudios-geograficos/

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y Universidad de los Andes. (2020). *Manual de coberturas vegetales de Bogotá, D. C.* Ediciones Uniandes.

Jima Chugá, M. A. (2017). *Identificación de productos forestales no maderables (PFNM) – artesanales en la Reserva Hídrica Nangulvi Bajo, zona de Intag, noroccidente del Ecuador.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Jiménez Cueva, T. P., & Palacios Herrera, B. G. (2023). Establecimiento de una plantación de nueve especies forestales con fines de rehabilitación de suelos degradados en la hacienda La Florencia en el cantón y provincia de Loja. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7*(4), 2036–2051.

Jørgensen, P. M., & León-Yánez, S. (1999). *Catalogue of the vascular plants of Ecuador*. Missouri Botanical Garden Press.

Kessler, M. (2002). The elevation gradient of vegetation in the Andes of Bolivia and Peru: generic patterns and specific differences. *Organisms Diversity & Evolution*, *2*(4), 275–281.

Khurana, E., & Singh, J. S. (2001). Ecology of seed and seedling growth for conservation and restoration of tropical dry forest: A review. *Forest Ecology and Management, 136*(1–3), 1–14. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00325-2

Killingbeck, K. T. (1996). Nutrients in senesced leaves: Keys to the search for potential resorption and resorption proficiency. *Ecology*, *77*(2), 333–327. doi.org

Kozlowski, T. T., & Pallardy, S. G. (2002). Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *Botanical Review, 68*(2), 270–334.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, *123*(1–2), 1–22.

Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los trópicos*. GTZ, Eschborn.

Landis, T. D., Dumroese, R. K., & Haase, D. L. (2010). *The container tree nursery manual: Seedling processing, storage, and outplanting.* Agric. Handbook, 67*4*,(7). https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-274

Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., & Barnett, J. P. (1990). *The container tree nursery manual. Volume 4: Seedling nutrition and irrigation.* Agriculture Handbook 674, USDA Forest Service.

Lang, W., Zhang, Y., Li, X., Meng, F., Liu, Q., Wang, K., Xu, H., Chen, A., Peñuelas, J., Janssens, I. A., & Piao, S. (2025). Phenological divergence between plants and animals under climate change. *Nature Ecology & Evolution*, *9*, 261–272. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02597-0

Leakey, R. R. B. (2004). *Physiology of vegetative reproduction.* Encyclopedia of Forest Sciences.

Leakey, R. R. B. (2012). *Living with the trees of life: Towards the transformation of tropical agriculture*. CABI. https://doi.org/10.1079/9781845936365.0000

Leakey, R. R. B. (2014). *Plant cloning: Macropropagation.* Encyclopedia of Agriculture and Food Systems, 4, 349–359. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00105-3

Leishman, M. R., Wright, I. J., Moles, A. T., & Westoby, M. (2000). *The evolutionary ecology of seed size. Seeds: The ecology of regeneration in plant communities*, 31–57.

León, S. E. (2016). *Caracterización de las proteínas de tocte (Juglans neotropica* Diels*) y su digestibilidad gastrointestinal in vitro*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato].

León Suquilanda, L. M., Cueva Oviedo, P. G., Aguirre Mendoza, Z., & Kvist, L. (2006). Composición florística, estructura, endemismo y etnobotánica del bosque nativo "El Colorado", en el cantón Puyango, provincia de Loja. *Lyonia, 10*(2), 105–115. http://www.lyonia.org/downloadPDF.php?pdfID=2.413.1

Li, H., Wang, Y., Li, S., Askar, A., & Wang, H. (2022). Shelter efficiency of various shelterbelt configurations: A wind tunnel study. *Atmosphere, 13*(7), 1022.

Linnaeus, C. (1753). *Species plantarum* (Vol. 2). Laurentii Salvii.

Liquinchano Quiranza, A. E. (2026). *Evaluación edafoclimática y cobertura arbórea en tres sistemas agroforestales con café (Coffea arabica L.) en Cananvalle, provincia de Imbabura.* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Lojan, L. (1992). *El verdor de los Andes.* Proyecto Desarrollo Forestal Participativo en Los Andes, Quito, Ecuador.

Long, J. N. (1995). Using stand density management diagrams to forecast engendering and structural profiles. *Forest Ecology and Management*, *73*(1-3), 109-115.

López, A. (2023). *Determinación del factor de forma de Juglans neotropica* Diels *en predio universitario Yuyucocha, Imbabura, Ecuador*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

López C., J. (1999). *Tratamientos pregerminativos aplicados a la semilla de cedro negro para reducir su periodo de germinación*. En R. Salazar (Coord.), Resúmenes: II Simposio sobre avances en la producción de semillas forestales en América Latina (18–22 de octubre de 1999). Santo Domingo, República Dominicana.

López, J., & Piedrahíta, E. (1998). Respuesta de la semilla de cedro negro (*Juglans neotropica* Diels) a la aplicación de tratamientos pregerminativos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, *51*(1), 217- 235.

Loughnan, D., Joly, S.,Legault, G.,Kharouba, H., Betancourt, M. & Wolkovich, EM, (2024). Phenology varies with phylogeny but not by trophic level with climate change. *Nature Ecology & Evolution, 8*, 1889-1896. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02499-1

Lozano, D., Veintimilla, D., & Pucha, D. (2026). Acumulación anual del carbono a partir de anillos de crecimiento en *Juglans neotropica* Diels y *Vachellia macracantha* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Seigler & Ebinger, al sur de Ecuador. *Bosques Latitud Cero, 16*(2), 59–75. https://doi.org/10.54753/blc.v16i2.2635

Luna Chávez, C. M. (2015). *Influencia de la temperatura en el teñido de fibras proteínicas (queratina) con hojas de nogal*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao Perú].

Maffi, L. (2005). Linguistic, cultural, and biological diversity. *Annual Review of Anthropology, 34*, 599–617. https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.34.081804.120437.

Maldonado Montenegro, N. N. (2023). *Efecto de cuatro tratamientos pre germinativos en semillas de nogal (Juglans neotropica* Diels*), Jaén, Cajamarca*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú].

Manning, W. E. (1957). Notes on Juglandaceae: The genus *Juglans* in South America. *Brittonia, 9*(1), 17–37. https://doi.org/10.2307/2804975.

Manning, W. E. (1960). The genus *Juglans* in South America: Additions. *Brittonia, 12*(1), 1–10.

Manos, P. S., & Stone, D. E. (2001). Evolution, phylogeny, and systematics of the Juglandaceae. *Annals of the Missouri Botanical Garden, 88*(2), 231–269.

Márquez, C. (2024). *Propagación sexual e injertado de la especie nativa Juglans neotropica* Diels *en la hacienda "La Florencia" del cantón y provincia de Loja*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Masias Bröcker, K. (2007). *Caracterización de las propiedades tintóreas del extracto de nogal (Juglans neotropica* Diels*) proveniente de la cuenca alta del río Zaña.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina].

Maza Vivanco, D., Abad, S., Malagón, O., & Armijos, C. (2021). Productos forestales no maderables de la comunidad El Tundo: un remanente boscoso de biodiversidad y conocimiento ancestral del sur del Ecuador. *Revista Bionatura, 6*(4), 2161–2174.

McGranahan, G., & Leslie, C. A. (1991). Walnuts (*Juglans*). In J. N. Moore & J. R. Ballington Jr. (Eds.), *Genetic Resources of Temperate Fruit and Nut Crops* (pp. 907-951). International Society for Horticultural Science

Mediavilla, J. (2023). *Crecimiento inicial de Juglans neotropica* Diels*, con fertilización química y orgánica en el campus Yuyucocha*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Medina, J., Quizhpe, W., Déleg, J., Gonzalez, K., Aguirre, Z., Aguirre, N., Montaño, L., & Benítez, Á. (2021). Are *Juglans neotropica* plantations useful as a refuge of bryophytes diversity in tropical areas? *Life, 11*(5), 434. https://doi.org/10.3390/life11050434

Meier, U. (2013). Phenological Growth Stages. En M. D. Schwartz (Ed.), *Phenology: An Integrative Environmental Science.* (2.ª ed.). Springer.

Méndez Ramírez, E. E., & Jordán Mayorga, C. D. (2025). *Propuesta de elaboración de una pasta artesanal tipo gianduja de chocolate (Theobroma cacao) con tocte (Juglans neotropica) y la aceptabilidad en Guayaquil*. [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil, Ecuador].

Merino, B. (2024). *Diversidad y almacenamiento de carbono del arbolado urbano en la ciudad de Loja, Ecuador*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Mesén, F., Newton, A. C., & Leakey, R. R. B. (2001). Vegetative propagation of *Cordia alliodora* and other tropical forest trees. *Forest Ecology and Management*, *146*(1–3), 121–131. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00430-3

Mexal, J. G., & Landis, T. D. (1990). Target seedling concepts: Height and diameter. En *Proceedings of the Western Forest Nursery Association* (pp. 17–35). USDA Forest Service

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press.

Miller, W. (1987). A new species of *Gretchena* (Tortricidae) injurious to planted neotropical walnut. *Journal of the Lepidopterists' Society*. *41*(3), 151-153.

Minga, D. & Verdugo, A. (2016). *Árboles y arbustos de los ríos de Cuenca*. Serie Textos Apoyo a la Docencia Universidad del Azuay. Imprenta Don Bosco.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Unión de Organizaciones Campesinas e Indígenas de Cotacachi (UNORCAC), y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). *Chakra andina: Un sistema agrícola ancestral de las comunidades Kichwas de Cotacachi*. Ecuador.

Ministerio de Agricultura y Ganadería – Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica. (2015). *Mapa de órdenes de suelos del Ecuador (Escala 1:25.000)*. MAG-SIGTIERRAS. http://www.sigtierras.gob.ec/mapa-de-ordenes-de-suelos/

Ministerio de Ambiente y Energía. (2025). *Plan Nacional de Restauración Ecológica con Enfoque de Paisaje 2025–2035*. Gobierno del Ecuador.

Ministerio de Ambiente y Energía [MAE], Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca [MAGP], & Ministerio de Producción, Comercio Exterior e Inversiones [MPCEI]. (2026). *Estrategia Forestal Sostenible del Ecuador (EFSE) 2026–2050*. Gobierno del Ecuador.

Ministerio de Cultura y Patrimonio del Ecuador. (2020). *Declaratoria del Patrimonio Cultural Inmaterial del Ecuador: Tallado en madera de San Antonio de Ibarra*.

Ministerio del Ambiente. (2019). *Plan Nacional de Restauración Forestal 2019 - 2030*. Quito - Ecuador.

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (s. f.). *Sistema de Información de Biodiversidad del Ecuador (SiB-Ec): Catálogo de especies*. Recuperado el 19 de agosto de 2026, de https://biodiversidad.ambiente.gob.ec/biodiversidad-web/reports/catalogo.html?id=1

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2004). *Acuerdo Ministerial N. º 003: Norma de semillas forestales* (Registro Oficial N.º 269, 9 de febrero de 2004). Gobierno del Ecuador.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2006). *Norma para el manejo sustentable de los bosques andinos* (Acuerdo Ministerial No. 128, Registro Oficial No. 416, 13 de diciembre de 2006).

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013). *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural.

Ministerio del Ambiente del Ecuador- MAE. (2014). *Normas para el Manejo Forestal Sostenible de los Bosques Nativos Húmedos*. Acuerdo Ministerial 125. Quito. EC.

Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2014a). *Evaluación Nacional Forestal: Resultados*. Ministerio del Ambiente del Ecuador y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2014b). *Propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de 93 especies forestales – Ecuador*.

Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). *Especies forestales arbóreas y arbustivas de los bosques montanos del Ecuador*.

Miyawaki, A. (2004). Restoration of living environment based on vegetation ecology: Theory and practice. *Ecological Research*, *19*(1), 83–90.

Moles, A. T., y Westoby, M. (2004). Seedling survival and seed size: A synthesis of the literature. *Journal of Ecology*, *92*(3), 372–383. https://doi.org/10.1111/j.0022-0477.2004.00884.x

Molina Quilca, C. S. (2024). *Cálculo de la huella de carbono en el campus Yuyucocha* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica del Norte]. Ibarra, Ecuador.

Montagnini, F., & Jordan, C. F. (2005). *Tropical forest ecology: The basis for conservation and management*. Springer.

Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61–62, 281–295.

Montalvo, C. & CE Cerón. (2003). Plantas medicinales que se gastan en los mercados de Cuenca. págs: 47-54. En: P. Naranjo, JL Cobá (eds.). *Etnomedicina en el Ecuador.* Biblioteca Ecuatoriana de Ciencias Vol.3. Universidad Andina Simón Bolívar Sede Ecuador, Corporación Editora Nacional, Quito.

Montalvo, P. (2017). Usos medicinales del nogal andino en comunidades rurales del Ecuador. *Revista de Etnobotánica, 5*(2), 33–47.

Morales, N. (2026). *Evaluación del efecto de la fertilización en una plantación de Juglans neotropica* Diels*, San Roque, Imbabura.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Morellato, L. P. C., Alberton, B., Alvarado, S. T., Borges, B., Buisson, E., Camargo, M. G. G., Cancian, L. F., Carstensen, D. W., Escobar, D. F. E., Leite, P. T. P., Mendoza, I., Rocha, N. M. W. B., Soares, N. C., Silva, T. S. F., Staggemeier, V. G., Streher, A. S., Vargas, B. C., & Pérez, C. A. (2016). Linking plant phenology to conservation biology. *Biological Conservation, 195*, 60–72. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.12.033

Morellato, L. P. C., Altomare, M., & Gressler, E. (2025). Phenology in South and Central America: An updated review of plant responses to climate change. *Environmental Science Reviews*, *31*(2), 105–118.

Moreno, C. (2024). *Potencial de productividad de tinte a partir de frutos de Juglans neotropica* Diels *en una hectárea del Bosque protector el Tundo del Cantón Sozoranga de la provincia de Loja*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Moyon, L. (2020). *Evaluación de la actividad antibacteriana y hemoaglutinante de extractos obtenidos a partir de Juglans neotropica* Diels*.* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Mu, X.-Y., Tong, L., Sun, M., Zhu, Y.-X., Wen, J., Lin, Q.-W., & Liu, B. (2020). Phylogeny and divergence time estimation of the walnut family (Juglandaceae) based on nuclear RAD-Seq and chloroplast genome data. *Molecular Phylogenetics and Evolution,* 147, 106802. https://doi.org/10.1016/j.ympev.2020.106802

Navarrete, B. & Ruiz, E. (2024). *Evaluación de medidas de control de Gretchena garai en una plantación de Juglans neotropica* Diels *en el campus Yuyucocha provincia de Imbabura.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Neergaard, P. (1977). *Seed pathology* (Vols. 1–2). Macmillan Press.

Norrbom, A. L., Zucchi, R. A., & Hernández-Ortiz, V. (1999). Phylogeny of the *Anastrepha fraterculus* species group (Diptera: Tephritidae). *Annals of the Entomological Society of America, 92*(3), 414–428.

Núñez, A. (2021). *Amaranto y nogal para el teñido de la fibra de alpaca*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Ochoa, Z. & Quinche, J. (2024). *Estudio fenológico de Juglans neotropica* Diels *y su relación con condiciones climática en cuatro prácticas de árboles plantados.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Oliver, C. D., & Larson, B. C. (1996). *Forest stand dynamics* (Updated ed.). John Wiley & Sons.

Ordóñez, D. (2024). *Formación de anillos de crecimiento por estrés hídrico y defoliación en Juglans neotropica* Diels *y Podocarpus oleifolius D. Don. bajo condiciones controladas en la ciudad de Loja*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Orellana Armijos, V. B. (2018). *Morfología, dormición y germinación de semillas de Juglans neotropica* Diels *(Juglandaceae)* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja]. https://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/22708

Ortega, D. (2021). *Estudio etnofarmacológico de Juglans neotropica (tocte) y sus aplicaciones en la industria*. [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador].

Ortega, H. (2007). *Estudio del ataque de Gretchena garai miller en nogal (Juglans neotropica* Diels*) en plantación sola y asociada con cuatro especies forestales en dos sitios.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Ospina, C., Hernández, R., Aristizabal, F., Patiño, J. & Salazar, J. (2003). *El cedro negro: una especie promisoria de la zona cafetera*. Boletin técnico No. 25. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

Oyos, E. (2019). *Construcción de modelos alométricos para estimación de contenido de carbono en plantaciones de nogal (junglas neotropica) con y sin asocio de café (coffea sp.), cantón Pimampiro*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Padrón, P. S., & Rasmussen, C. (2025). Ecuadorian bumble bees (Apidae: Bombus): Species diversity, distribution, and floral associations. *Journal of Melittology,* (139), 1–45.

Paguay, I. (2013). *Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de tres especies forestales andinas: platuquero (styloceras sp), yagual (polylepis racemosa), nogal (Juglans neotropica*). [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Palacios, B., Aguirre, Z., Pucha, D., Jonathan, M., Armijos, C., Jumbo, J., & Rojas, A. (2017). Factor de forma y productividad de una plantación de *Juglans neotropica* Diels, establecida en los predios de la Universidad Nacional de Loja. En *Memorias del I Congreso Internacional Bosques y Agroforestería*, ESPOCH, Riobamba, Ecuador, 18–20 de octubre de 2017.

Palacios-Herrera, B. (2025). Extracción y productividad de tinte natural de *Juglans neotropica* Diels a partir de frutos del bosque nativo "La Victoria", cantón Macará, provincia de Loja: una perspectiva sostenible. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *9*.

Palacios-Herrera, B., Pereira-Lorenzo, S., & Pucha-Cofrep, D. (2025a). *Influence of climate, soil, and topography on the phenotypic traits of Juglans neotropica Diels matrix trees in natural and artificial populations of the Loja and Zamora-Chinchipe provinces of Ecuador* (Preprint). *Preprints.org*. https://doi.org/10.20944/preprints202501.1434.v1

Palacios-Herrera, B., Pereira-Lorenzo, S., & Pucha-Cofrep, D. (2023). Natural and Artificial Occurrence, Structure, and Abundance of *Juglans neotropica* Diels in Southern Ecuador. *Agronomy*, *13*(10), 2531. .

Palacios-Herrera, B., Pereira-Lorenzo, S., & Pucha-Cofrep, D. (2025b). Phenological variation of native and reforested *Juglans neotropica* Diels in response to edaphic and orographic gradients in southern Ecuador. *Diversity*, *17(9),*627.

Palacios-Herrera, B., Pereira-Lorenzo, S., & Pucha-Cofrep, D. (2025c). Phenotypic variability of *Juglans neotropica* Diels from different provenances during nursery and plantation stages in southern Ecuador. *Forests, 16*(7), 1141.

Palacios, W. (2011). *Árboles del Ecuador*. Ministerio del Ambiente.

Palacios, W. (2016). *Árboles del Ecuador: Familias y géneros*. Universidad Técnica del Norte.

Palomino, J., Barra, M., Bohórquez, M., Sosa, G., & Hurtado, W. (1991b). *Ensayo de plantación de especies tropicales nativas con diferentes tipos de plantón en la Selva Central del Perú* (Documento 70). Instituto Nacional de Investigación Agraria & Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

Pambaquishpe Valverde, E. A. (2023). *Evaluación del efecto de los sustratos en la germinación de la semilla de Juglans neotropica* Diels. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Panamá Mármol, I. G. (2019). *Aporte del Eucalyptus globulus Labill a la economía de la comunidad de Perugachi, cantón Otavalo, provincia de Imbabura.* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Paredes Rodríguez, H. (2014). *Plan de forestación y reforestación de la provincia de Imbabura*. Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Imbabura (Prefectura de Imbabura) y Consorcio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador (CONGOPE).

Paredes Rodríguez, H. O., Carvajal Benavides, J. G., Herrera Gómez, E. P., & Reascos Paredes, I. M. (2026). Integration of wood anatomy and artificial intelligence: A technological framework based on the UTN Xylotheque for forensic identification and forest governance in Ecuador. *Forests*, *17*, 781. https://doi.org/10.3390/f17070781

Peña, D., Rocano, M.,Salazar, J. & Torres, C. (2014). Inducción de la brotación in vitro de microplántulas de Nogal (*Juglans neotropica*) tratadas con Thidiazuron (TDZ) y 6-Bencilaminnopurina (BAP). *MASKANA, 5*(2), 81-85.

Peñuelas, J., et al. (2024). Phenological divergence between plants and animals under climate change. *Nature Ecology & Evolution*.

Plants of the World Online (POWO). (2024). *Juglans neotropica* Diels. Royal Botanic Gardens, Kew. Plants of the World Online.

Pollegioni, P., Woeste, K., Chiocchini, F., Del Lungo, S., Ciolfi, M., Olimpieri, I., Tortolano, V., Clark, J., Hemery, G. E., Mapelli, S., & Malvolti, M. E. (2017). Rethinking the history of common walnut (*Juglans regia* L.) in Europe: Its origins and human interactions. *PLOS ONE, 12*(3), Article e0172541.

Polo, G., Salazar, F., y Medina, L. (2017). *Catálogo de árboles patrimoniales del Distrito Metropolitano de Quito*. Municipio del DMQ.

Portilla, J. (2025). *Generación de información anatómica de la madera de cinco especies forestales para su identificación a través de inteligencia artificial*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Pretzsch, H. (2009). *Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4

Primack, R. B., & Miller-Rushing, A. J. (2012). Uncovering, collecting and analyzing records to investigate the ecological impacts of climate change. *BioScience*, 62(2), 170–181.

Proyecto Desarrollo Forestal Campesino. (2000). *Sistematización de experiencias en forestería social: Huertos agroforestales familiares*.

Pucha, D., Palacios, B., Muñoz, J., Jumbo, N., Saenz, H., Castillo, J., Ruales, G., & Quichimbo, L. (2019). *Determinación de los turnos biológicos de corta para el manejo forestal sostenible al sur del Ecuador*. En M. E. Encalada Córdova, Z. H. Aguirre Mendoza, E. V. Alvarado Jaramillo, & K. A. Pucha Cofrep (Eds.), Libro de memorias del I Simposio de Investigación Científica (pp. 132–141). Universidad Nacional de Loja.

Quattrocchi, U. (2012). *CRC world dictionary of medicinal and poisonous plants: Common names, scientific names, eponyms, synonyms, and etymology* (Vol. 3). CRC Press.

Quezada, L. (2023). *Factor de forma, regeneración natural y carbono almacenado en necromasa de Juglans neotropica* Diels*, en una hectárea de bosque de la reserva natural El Tundo, cantón Sozoranga provincia de Loja.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Quezada, L. A., y Palacios, B. G. (2024). Factor de forma, regeneración natural y carbono almacenado en necromasa de *Juglans neotropica* Diels, en una hectárea de bosque en la Reserva Natural El Tundo, cantón Sozoranga, provincia de Loja. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8*(1), 11284–11300.

Quintero-García, O. D., & Jaramillo-Villegas, S. (2012). Rescate y germinación in vitro de embriones inmaduros de cedro negro (*Juglans neotropica* Diels). *Acta Agronómica, 61*(1), 52–60.

Quiroz, R. (2013). *Evaluación de la actividad cicatrizante de un gel elaborado a base de los extractos de nogal (Juglans neotropica* Diels*), ortiga (Urtica dioica L.), sábila (Aloe vera), en ratones (Mus musculus).* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Quizhpe Romero, J. P. (2024). *Microorganismos e insectos asociados a Juglans neotropica Diels en una plantación instalada en estepa espinosa montano bajo, Estación Experimental Tunshi de la ESPOCH* [Trabajo de titulación de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Ramírez, F. (2022). Nut length–weight relationships in the endangered Nogal (*Juglans neotropica* Diels). *Genet Resour Crop Evol*.,*69*:1731–1736.

Ramírez, F. (2025). Nogal (*Juglans neotropica* Diels): The case study of a venerable and endangered tree from Bogotá, Colombia. *Arboricultural Journal*, *47*(1).

Ramírez, F., & Kallarackal, J. (2015). *Responses of Fruit Trees to Global Climate Change*. Springer.

Ramirez, F., Kallarackal, J. (2021). The phenology of the endangered Nogal (*Juglans neotropica* Diels) in Bogota and its conservation implications in the urban forest. *Urban Ecosyst.*, *24*, 1327–1342.

Ramírez, J., Oyos, E. & Chagna, E. (2019). Almacenamiento de carbono en plantaciones de *Juglans neotropica* Diels, con y sin asocio de *Coffea arabica* L. *Ciencia y Tecnología, 12(2):65-72.*

Ramírez, J., Vallejos, H. & Añazco, M. (2023). Evaluación de tratamientos pre-germinativos en semillas de *Juglans neotropica* Diels. en el norte del Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, *13*(1).

Ramirez-Lopez, J.-L., Añazco, M., Vallejos, H., Arcos, C., Estrada, K. (2025). Assessment of Three Provenances of *Juglans neotropica* Diels to Identify Optimal Seed Sources in the Northern Ecuadorian Andes. *Int. J. Plant Biol.,* 16, 87. https://doi.org/10.3390/ijpb16030087

Ramírez Viena, L., Mostacero León, J., López Medina, E., De La Cruz Castillo, A. J., & Gil Rivero, A. E. (2020). Aspectos etnobotánicos de Cuspón, Perú: Una comunidad campesina que utiliza 57 especies de plantas en sus diversas necesidades. *Scientia Agropecuaria, 11*(1), 7–14. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.01

Ramos Cevallos, N., Castro Luna, A., Castillo Morales, F., Tinoco, L. V., Gonzáles Elera, S., Alcarraz Curi, M., Zuñiga Santi, A., Arquinigo Bazan, N., Victorio Cruz, D., Chavez Rojas, D., & Tapia Burga, Y. (2024). Composición química, actividad antioxidante y anti-Candida albicans de aceite esencial de las hojas de J*uglans neotropica* Diels "nogal peruano". *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *90*(2). https://doi.org/10.37761/rsqp.v90i2.464

Ramos Veintimilla, R. A., Vera Vélez, R., Grijalva Olmedo, J. E., & Ramos Veintimilla, M. R. (2022). Biomasa anhidra en plántulas de *Juglans neotropica* Diels, en la etapa de vivero. *Alfa Publicaciones, 4*(32), 97–114.

Ramos Veintimilla, R. A., Vera Vélez, R., Grijalva-Olmedo, J. E., & Ramos Veintimilla, M. R. (2025). Evaluation of Adaptive Responses of *Juglans neotropica* Diels in Ecuador. *International Journal of Plant Biology, 16*, 26.

Ramos-Veintimilla, R. A., Romero-Cañizares, F., González-Narváez, M. A., Castro-Gómez, R., García-Mora, M., & Fierro-Ricaurte, M. A. (2024a). Dasometric behavior of genetic families of the threatened forest species *Juglans neotropica* Diels, collected in the province of Tungurahua, Ecuador. *African Journal of Biological Sciences, 6*(8), 1855–1871. https://doi.org/10.33472/AFJBS.6.8.2024.1855-1871

Ramos-Veintimilla, R., Murillo-Gamboa, O., & Castro-Gómez, R. (2024b). 4.5 years-old provenance/progeny test analysis of *Juglans neotropica* Diels in Tunshi, Ecuador. *Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias***,** 3, 1426.

Rave-Oviedo, S. Y., Montenegro-Ríos, M., & Molina-Rico, L. J. (2013). Caída y descomposición de hojarasca de *Juglans neotropica* Diels (1906) (Juglandaceae) en un bosque montano andino, Pijao (Quindío), Colombia. *Actualidades Biológicas*, *35*(98), 33–43.

Reátegui, C. (2022). *Respuesta inicial de una plantación de dos procedencias de Juglans neotropica Diels a la fertilización aplicada en tres estratos en la "Hacienda La Florencia" del Cantón y la Provincia de Loja.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Red Agro-Forestal Ecuatoriana. (1993). *I Congreso Agro-Forestal Ecuatoriano: Memorias*.

Reyes, D. (2024). *Estudio dendroclimático de Juglans neotropica* Diels *en cuatro ecosistemas andinos de la provincia de Loja al sur de Ecuador*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Richardson, A. D., Keenan, T. F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., & Toomey, M. (2013). Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology, 169*, 156–173.

Ritchie, G. A. (1984). Assessing seedling quality. En *Forest nursery manual: Production of bareroot seedlings* (pp. 243–259). Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers.

Ritchie, G. A., Landis, T. D., Dumroese, R. K., &Haase, D. L. (2010). Assessing plant quality. In T. D. Landis, R. K. Dumroese, & D. L. Haase (Eds.), *The Container Tree Nursery Manual* (Vol. 7, Agriculture Handbook No. 674). U.S. Department of Agriculture, Forest Service.https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_series/wo/wo_ah674_v7.pdf.

Rivera Guevara, M. E. (2026). *Comportamiento ecológico de Juglans neotropica* Diels *en cuatro prácticas agroforestales en la provincia de Imbabura.* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Rivero-Guerra, A. (2021). Uso tradicional de especies de plantas en trece provincias de Ecuador. *Collectanea Botanica 40*: e002.

Roberts, E. H. (1973). Predicting the storage life of seeds. *Seed Science and Technology*, *1*, 499–514.

Rocano Curillo, M. N. (2017). *Eficiencia de la multiplicación in vitro de Juglans neotropica (nogal) en Biorreactores de Inmersión Temporal (BIT)* [Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca].

Rocano, M., Villena, P. & Peña, D. (2017). Evaluación de los sistemas de cultivo semisólido y BIT en la multiplicación *in vitro* de *Juglans neotrópica*. *Maskana, 8*(1).

Rojas Rodríguez, F., & Torres Córdoba, G. (2008). Árboles del Valle Central de Costa Rica: reproducción. *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica), 5*(13), 1–3.

Rojas Flores, R. A., Pineda López, L. G., Quitama Pastaz, J. M., Flores Chamba, J. E., Bustamante Durán, C. I., & Bolaños Pantoja, M. J. (2024). *Saberes ancestrales e interculturalidad en salud en el Qhapaq Ñan de Loja: Etnobotánica y ritualidad: estrategias de sanación*. Editorial Universitaria, Universidad Nacional de Loja.

Rojas-Robles, R., & Stiles, F. G. (2009). Fenología reproductiva de la palma *Oenocarpus bataua* en un bosque de los Andes colombianos. *Caldasia, 31*(2), 297–314.

Romero-Astudillo, J. P., Álvarez-Játiva, L. H., Tafur-Escanta, P., & Guamán-Tabango, J. (2026). Microclimatic variability of atmospheric and soil moisture in Andean *Juglans neotropica* plantations. *Atmosphere, 17*, 708. https://doi.org/10.3390/atmos17070708

Romero-Flores, S. (2025). *Efecto de hormonas de enraizamiento en propagación vegetativa de Juglans neotropica Diels, en el Campus Yuyucocha*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Romero-Guaicha, J. (2025). *Efecto del tratamiento pregerminativo de la semilla con rayos láser en la germinación y crecimiento dasométrico temprano de Juglans neotropica* Diels *ESPOCH, Riobamba*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Romoleroux, K. (2004). Juglandaceae. En P. M. Jørgensen, M. H. Nee, y S. G. Beck (Eds.), *Catálogo de las plantas vasculares de Bolivia* (pp. 375–376). Missouri Botanical Garden Press.

Rondinel Valenzuela, G. (2018). *Efecto genotóxico in vitro del extracto hidroalcohólico de Juglans neotropica* Diels *"nogal" frente a ADN genómicos humano y de Staphylococcus aureus. Ayacucho.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Perú].

Rosales Acosta, X. (2009). *Estudio del tocte y propuesta gastronómica en la repostería*. [Tesis de posgrado, Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador].

Rosero, E. (2011). *Estudio del efecto de fertilización en el establecimiento del cultivo del nogal (Juglans neotropica* Diels*), en la granja experimental Tunshi*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Rosero Echeverría, M. A. (2026). *Medidas de control de Gretchena garai y manejo silvicultural en una plantación de Juglans neotropica* Diels, *en el campus Yuyucocha–Ibarra*. [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Ruíz Castillo, J. P. (2020). *Propiedades físicas, mecánicas y trabajabilidad de fresno (Fraxinus americana L.) proveniente de la Estación Experimental "La Favorita", Santo Domingo de los Tsáchilas.*[Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Ruiz, L. (2024). *Evaluación de tres procedencias de Juglans neotropica* Diels *en etapa de vivero, en el campus Yuyucocha.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Ruiz Quiroz, J. R., & Salazar Salvatierra, M. E. (2021). Composición química y actividad antibacteriana de los aceites esenciales de *Citrus paradisi***,** *Juglans neotropica* Diels**,** *Schinus molle* y *Tagetes elliptica* Smith**.** *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *87*(3), 228–241.

Saavedra Quezada, C. R., & Bernal Sarmiento, L. A. (2023). Estructura y contenidos del imaginario ritual de limpia en los Andes Ecuatorianos. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 4*(2), 2972–2987. https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.809.

Sabogal, C., Guariguata, M. R., Broadhead, J., Lescuyer, G., Savilaakso, S., Essoungou, J. N., & Sist, P. (2013). *Manejo forestal de uso múltiple en el trópico húmedo: Oportunidades y desafíos para el manejo forestal sostenible* (Estudio FAO: Montes No. 173). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Centro Internacional de Investigación Forestal.

Saldaña, M. & Vera, K. (2019). *Diagnóstico de plagas y enfermedades presentes en las plantas de la zona urbana de la ciudad de Cuenca*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca].

Sandoval Valles, L. M., & Venegas Cervantes, O. J. (2009). *Elaboración de turrón duro con quinua (Chenopodium quinoa L.) y almendra de nogal (Juglans neotropical)*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte, Ecuador].

Sarango, A. (1987). *Taxonomía, bioecología y distribución del barrenador del nogal (Juglans neotropica* Diels*.) en la Provincia de Loja.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Sayas Rivera, R., & Huamán Mesía, L. (2009). Determinación de la flora polinífera del valle de Oxapampa (Pasco-Perú) en base a estudios palinológicos. *Ecología Aplicada, 8*(2), 53–59. Universidad Nacional Agraria La Molina

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2026). *Fichas técnicas sobre propiedades físicas y mecánicas de probetas de madera provenientes de bosques naturales*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.

Schmidt, L. (2000). *Guide to handling of tropical and subtropical forest seed*. Danida Forest Seed Centre.

Schwartz, M. D. (Ed.). (2024). *Phenology: An Integrative Environmental Science* (3.ª ed.). Springer.

Séptimo Díaz, R. E. (2020). *Efecto de las fitohormonas en la germinación de las semillas de nogal (Juglans pyriformis Liebmann) en el invernadero de la Ciudad Universitaria Shancayán* . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú].

Servicio Ecuatoriano de Normalización**.** (2011). *Sistema de clasificación y calificación de madera aserrada proveniente de bosques húmedos tropicales* **(**NTE INEN 2580**).**

Silva Valqui, G. (2017). *Metodologías de escarificación para la producción de plantones de nogal (Juglans neotropica,* Diels*), en Rodríguez de Mendoza, Amazonas.* [Tesis de pregrado,Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú].

Simbaña, S. (2023). *Evaluación ecológica asociada a Juglans neotropica* Diels*., en dos agroecosistemas de la Provincia de Imbabura*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Simons, A. J., & Leakey, R. R. B. (2004). Tree domestication in tropical agroforestry. *Agroforestry Systems*, 61–62, 167–181.

Skovsgaard, J. P., & Vanclay, J. K. (2008). Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, *81*(1), 13–31. https://doi.org/10.1093/forestry/cpm041

Smith, D. M., Larson, B. C., Kelty, M. J., & Ashton, P. M. S. (1997). *The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology* (9.ª ed.). John Wiley & Sons.

Somarriba, E. (2012). Definición de agroforestería. En G. Detlefsen & E. Somarriba (Eds.), *Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica* (pp. 21–26). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). catie.ac.cr

Sono Toledo, D. D., Arcos Unigarro, C. R., Aroca Farez, A. E., Carvajal Benavides, J. G.,& Albuja Illescas, L. M. (2024). Árboles y sociedad: percepciones sobre *Juglans neotropica* Diels. *Perfiles, 1*(32), 54–63.

Souza, R. P., & Válio, I. F. M. (2001). Seed size, seed germination and seedling survival of Brazilian tropical tree species differing in successional status. *Biotropica, 33*(3), 447–457.

Stone, D. E. (1993). Juglandaceae. In K. Kubitzki, J. G. Rohwer, & V. Bittrich (Eds.), *The families and genera of vascular plants: Vol. 2. Flowering plants: Dicotyledons: Magnoliid, Hamamelid and Caryophyllid families* (pp. 348–359). Springer-Verlag.

Tapia Quilambaqui, S. G. (2025). *Cálculo de la huella de carbono en el campus Yuyucocha de un metro cúbico de madera rolliza de Cupressus macrocarpa, un kilogramo de nuez de Juglans neotropica* Diels *y una libra de café de la variedad Caturra* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica del Norte].

Tegel, W., Elburg, R., Hakelberg, D., Stäuble, H., & Büntgen, U. (2012). Early Neolithic Water Wells Reveal the World's Oldest Wood Architecture. *PLoS ONE, 7*(12), e51374. doi: 10.1371/journal.pone.0051374

Teran, J. (2015). *Tintura de algodón con colorante vegetal del fruto del nogal (Juglans neotrópica) de forma artesanal*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Tesoro Bardales Chuquilín, A. M., & Ureta Lumbe, Y. M. S. (2017). *Actividad antifúngica con infusión de Juglans neotropica* Diels *(nogal) en colonias de Candida albicans (ATCC 10231).* [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo].

Thompson, B. E. (1985). Seedling morphological evaluation—What you can tell by looking. In M. L. Duryea (Ed.), *Evaluating seedling quality: Principles, procedures, and predictive abilities of major tests* (pp. 59–71). Forest Research Laboratory, Oregon State University.

Toapanta Cueva, K. N. (2026). *Caracterización del arbolado urbano en la parroquia de Caranqui, Ibarra, Ecuador* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Toledo, V. M., y Barrera-Bassols, N. (2008). *La memoria biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías tradicionales*. Icaria Editorial.

Toro Vanegas, E. & Roldán Rojas, I. C. (2018). Estado del arte, propagación y conservación de *Juglans neotropica* Diels en zonas andinas. *Madera y Bosques, 24*(1).

Tovar, D. C. (2007). *Producción de plantas forestales en vivero*. FAO.

Tsakaldimi, M., Ganatsas, P., & Jacobs, D. F. (2013). Prediction of planted seedling survival of five Mediterranean species based on initial seedling morphology. *New Forests, 44*(3), 327–339.https://doi.org/10.1007/s11056-012-9339-3

Tsufac, A. R., Awazi, N. P., y Yerima, B. P. K. (2021). Characterization of agroforestry systems and their effectiveness in soil fertility enhancement in the south-west region of Cameroon. *Current Research in Environmental Sustainability, 3*, 100024.

Tweddle, J. C., Dickie, J. B., Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2003). Ecological aspects of seed desiccation sensitivity. *Journal of Ecology*, *91*(2), 294–304.https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00760.

Universidad Técnica del Norte. (2022). *Resolución No. 05 SO-02-HCD-2022-FICAYA-UTN* [Resolución del Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales].

Vaca Benavides, S. A. (2022). *Puesta en valor del tocte (Juglans neotropica) para su implementación en la gastronomía de la costa y sierra ecuatoriana*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte, Ecuador].

Vaca, J. (2022). *Estructura, productividad de madera y regeneración natural de Juglans neotropica* Diels *en la Hacienda la Florencia del cantón y provincia de Loja.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Vaca Llivigañay, J. A., & Palacios Herrera, B. G. (2023). Estructura, productividad de madera y regeneración natural de *Juglans neotropica* Diels en la Hacienda La Florencia del cantón y provincia de Loja. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7*(2), 1640–1655.

Valarezo Manosalvas, C., Valarezo Manosalvas, L., Villamagua, M. Á., & Guaya Pauta, P. (2026). *Suelos en plantaciones de café en la provincia de Loja: Características, clasificación, fertilidad, aptitud y manejo*. Editorial Universitaria - UNL.

Vallejos, H., Vilema, G., Díaz, C. & Cué, J. (2023). Estudio fenológico de *Juglans neotropica* Diels. en Imbabura – Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, *13*(2), 23-33.

Valverde, A. (2016). *Estudio y análisis del fruto seco Tocte (Juglans neotrópica) y su aplicación en la pastelería*. [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil, Ecuador].

Valverde, D., Carvajal. J., Valencia, X., Rosero, D. y Flores, J. (2023). Rol de *Juglans neotropica Diels* en la silvicultura urbana en la parroquia San Francisco del cantón Ibarra, provincia Imbabura. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(1), 2993-3017. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4637

Valverde-Rodríguez, J., Mera-Andrade, R., & García-Mera, N. (2020). Caracterización química de la madera de *Juglans neotropica* Diels: holocelulosa, lignina, extractivos y cenizas. *Revista Forestal del Perú, 45*(2), 55–64. https://doi.org/10.21704/rfp.v45i2.1597-

Varela, L. (2023). *Análisis del balance hídrico superficial en la etapa inicial de una plantación de Juglans neotropica* Diels. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Verma, P., & Raghubanshi, A. S. (2018). Urban forest restoration using the Miyawaki method: A case study from India. *Landscape and Ecological Engineering*, *14*(2), 205–214.

Vilcacundo, E., Alvarez, M., Silva, M., Carpio, C., Morales, D., & Carrillo, W. (2018). Fatty acids composition of tocte (*Juglans neotropica* Diels) walnut from Ecuador. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, *11*(2), 395–398.

Villacís, F. (2013). *Evaluación de tres tipos de sustratos y tres métodos de escarificación en la germinación de la semilla de nogal (Juglans neotrópica) a nivel de vivero*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja].

Villagrán, M. (2023). *Determinación de tratamientos pregerminativos de semillas de Juglans neotropica* Diels*, en Ibarra, Imbabura*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Villota, L. (2023). *Análisis de las propiedades físicas, anatómicas y trabajabilidad de la madera de Juglans neotropica* Diels*. Carchi, Ecuador*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Villota, L., Rosero, E., Farias, E., Valencia, X., Carvajal, J. & Benalcázar, E. (2024). Propiedades Tecnológicas de la Madera de Nogal *Juglans Neotropica* Diels, en la Provincia Carchi Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *8*(1), 1543-1573. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.

Viteri, B., Villalba, O. Montesdeoca, C. (1989). *Monografía de San Antonio de Ibarra*. Instituto Andino de Artes Populares del Convenio Andrés Bello.

Wadsworth, F. H. (2000). *Producción forestal para América tropical* (Manual de Agricultura 710-S). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio Forestal.

Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw, J. A., Jr., & Vanclay, J. K. (2011). *Forest growth and yield modeling*. Wiley-Blackwell.

Weiskopf, B., & Landero, M. L. (2011). *Guía metodológica: Implementación del proceso de fomento de cadena de valor*. GIZ.

Wendling, I., Trueman, S. J., y Xavier, A. (2014). Maturation and related aspects in clonal forestry. *New Forests*, *45*, 449–471.

Williams, M. (2003). *Deforesting the Earth: From prehistory to global crisis*. University of Chicago Press.

Woeste, K., & Michler, C. (2011). *Juglans*. In C. Kole (Ed.), Wild crop relatives: *Genomic and breeding resources: Forest trees* (pp. 77–88). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21250-5_5

World Flora Online (WFO). (2026). *Juglans neotropica* Diels. https://worldfloraonline.org

Worster, D. (1990). Transformations of the Earth: Toward an agroecological perspective in history. *The Journal of American History, 76*(4), 1087–1106.https://doi.org/10.2307/2936597

Wunder, S. (2005). *Payments for environmental services: Some nuts and bolts.* CIFOR Occasional Paper, 42.

Yaguache Ordóñez, R., & Carrión Puglla, R. (2004). *Construyendo una experiencia de desarrollo: El manejo de recursos naturales en Pimampiro*. Corporación para el Desarrollo de los Recursos Naturales (CEDERENA).

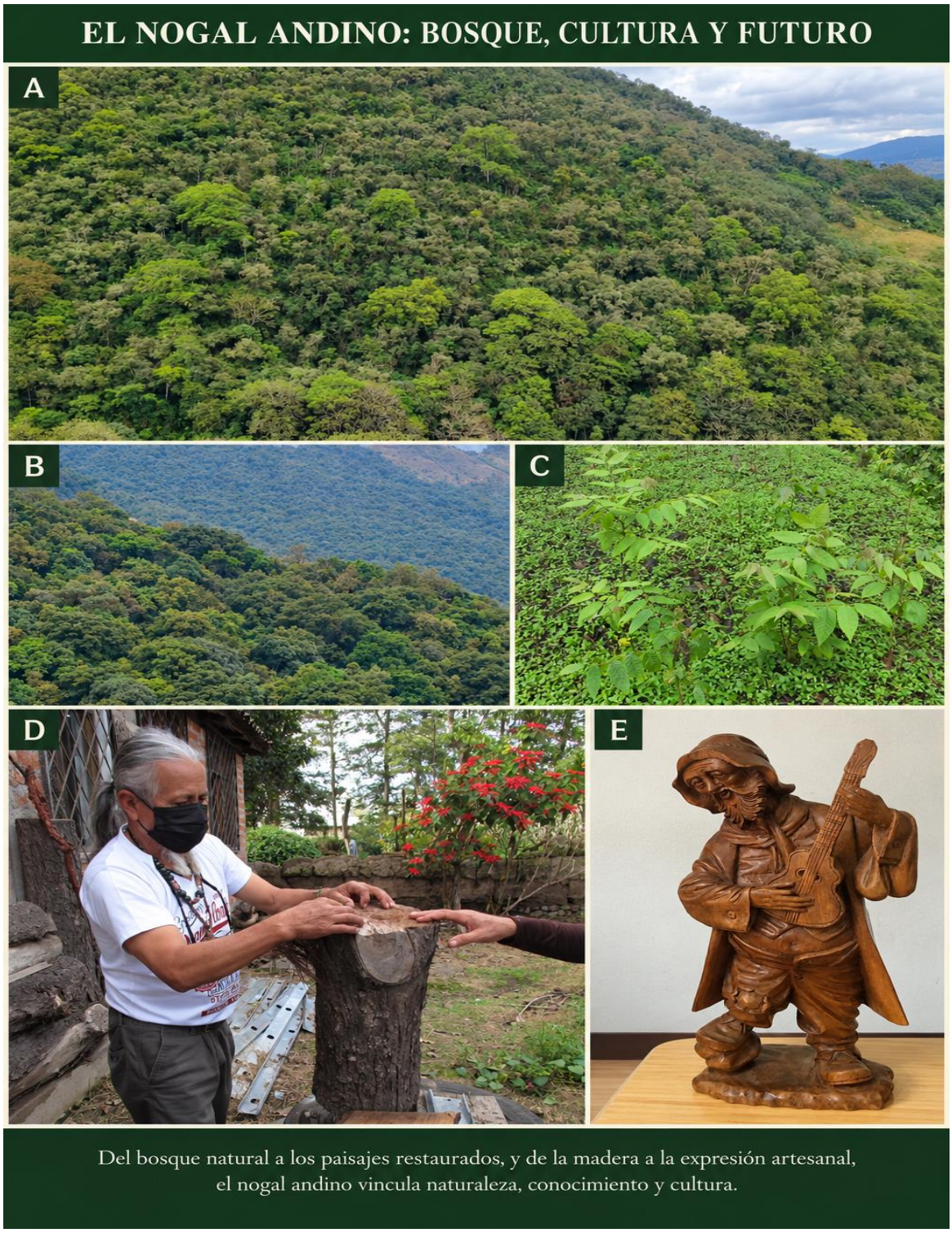
Yamberla, A. (2023). *Análisis de las características anatómicas, propiedades físicas y de trabajabilidad de Juglans neotropica* Diels*., Antonio Ante, Imbabura, Ecuador.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Yamberla, L. (2017). *Sostenibilidad del asocio de árboles con cultivos en el cantón Pimampiro, norte de Ecuador*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Zhang, Q., Xiang, X. G., Manchester, S. R., Murillo, E., & Zhang, X. (2021). Fossil-informed models reveal a boreotropical origin and divergent evolutionary trajectories in the walnut family (Juglandaceae). *Systematic Biology, 70*(6), 1163–1182.

Zhao, P. (2024). A review of research progress on evolutionary history and genomics of *Juglans*. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition).*

Zhou, H., Hu, Y., Ebrahimi, A., Liu, P., Woeste, K., Zhao, P., & Zhang, S. (2021). Whole genome based insights into the phylogeny and evolution of the Juglandaceae. *BMC Ecology and Evolution, 21*, 191.



A) Bosque natural con presencia de *J. neotropica* en el cerro Zañe, Loja. **B)** Bosque natural de El Tundo, Loja. **C)** Plantación joven de *J. neotropica* en la hacienda La Florencia, Loja. **D)** El artesano Juan Padilla examina una sección de madera de nogal. **E)** Escultura tallada en madera de nogal, San Antonio de Ibarra, Imbabura, Ecuador. Fotografías A–C: Augusto Pinzón y Luis Granda; fotografías D y E: Mario Añazco.

El nogal andino (*Juglans neotropica* Diels) es una especie emblemática de los Andes, vinculada durante generaciones con la alimentación, la medicina tradicional, la madera y los sistemas productivos de sus poblaciones. A pesar de su importancia ecológica, cultural y económica, el conocimiento sobre la especie permaneció durante décadas disperso entre investigaciones, tesis, publicaciones científicas, experiencias locales y saberes tradicionales.

El nogal andino *Juglans neotropica* Diels en Ecuador: Bases científicas para la conservación, el manejo forestal y la bioeconomía sostenible de los paisajes andinos integra y analiza ese conocimiento y lo articula con los avances científicos generados en Ecuador durante las últimas décadas.

La obra reúne aportes sobre historia y cultura, botánica, genética, distribución y ecología, fenología, semillas, propagación, plantaciones, sistemas agroforestales, productos y servicios ecosistémicos, crecimiento, biometría, manejo forestal, economía y bioeconomía.

Entre los avances que documenta destacan la construcción de la primera distribución geográfica georreferenciada de *J. neotropica* a escala nacional; el desarrollo del primer índice de sitio para la especie en Ecuador; la determinación de su modelo arquitectónico; la investigación del factor de forma y de modelos volumétricos bajo diferentes condiciones de crecimiento; los estudios sobre sanidad, crecimiento y turnos biológicos; y el análisis de su cadena de valor. Estos conocimientos se proyectan además hacia uno de los grandes desafíos contemporáneos: comprender las implicaciones del cambio climático para la conservación, restauración y establecimiento futuro de la especie.

Más que reunir información sobre un árbol, este libro busca **transformar datos en información, información en conocimiento y conocimiento en bases para tomar decisiones.**

Conservar el nogal andino significa conocerlo, valorarlo, manejarlo responsablemente y devolverle un lugar relevante en los paisajes del Ecuador.

ISBN: 978-9907-839-09-8
9789907839098