

Modelo Gaussiano Simplificado y su aplicación para estimar la dispersión de PM10 de áreas industriales

Teresa Orielle Barrios Mendoza, Misael Aquiles Bendezu Bendezu, Cynthia Victoria Bendezu Hernández,
Manuel Israel Hernández García, Isis Cristel Córdova Barrios, Félix Ricardo Belli Carhuayo,
Jaime Antonio Martínez Hernández, Víctor Alberto Candia Palomino

CIDE
EDITORIAL



Modelo Gaussiano Simplificado

y su aplicación para estimar la dispersión de PM10 de áreas industriales

Modelo Gaussiano Simplificado

y su aplicación para estimar la dispersión de PM10 de áreas industriales

Autores:

Teresa Oriele Barrios Mendoza

Misael Aquiles Bendezu Bendezu

Cynthia Victoria Bendezu Hernández

Manuel Israel Hernández García

Isis Cristel Córdova Barrios

Félix Ricardo Belli Carhuayo

Jaime Antonio Martínez Hernández

Víctor Alberto Candia Palomino

Modelo Gaussiano Simplificado y su aplicación para estimar la dispersión de PM10 de áreas industriales


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 cualquier otro, sin la autorización previa por escrito al Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE).

Copyright © 2025
Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador
Tel.: + (593) 04 2037524
<http://www.cidecuador.org>

ISBN: 978-9942-679-31-4
<https://doi.org/10.33996/cide.ecuador.MG2679314>

Dirección editorial: Lic. Pedro Misacc Naranjo, Msc.
Coordinación técnica: Lic. María J. Delgado
Diseño gráfico: Lic. Danissa Colmenares
Diagramación: Lic. Alba Gil
Fecha de publicación: febrero, 2025





Este libro ha sido revisado por pares externos

Teresa Barreto Véliz
Universidad de Oriente, Monagas, Venezuela, PAR 1

Rafael David Estrada
Universidad Gran Mariscal de Ayacucho (UGMA), Monagas,
Venezuela, PAR 2

Catalogación en la Fuente

Modelo Gaussiano Simplificado y su aplicación para estimar la dispersión de PM10 de áreas industriales / Teresa Oriele Barrios Mendoza, Misael Aquiles Bendezu Bendezu, Cynthia Victoria Bendezu Hernández, Manuel Israel Hernández García, Isis Cristel Córdova Barrios, Félix Ricardo Belli Carhuayo, Jaime Antonio Martínez Hernández, Víctor Alberto Candia Palomino- Ecuador: Editorial CIDE

126 p.: incluye tablas, figuras; 17,6 x 25 cm.

ISBN: 978-9942-679-31-4

1. Modelo Gaussiano

Semblanza de los autores

Teresa Oriele Barrios Mendoza

oriele.barrios@unica.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-6466-7766>



Petroquímica con más de 30 de experiencia en la docencia, docente Investigador, con maestría Investigación y Docencia Universitaria- UIGV. Doctor en Administración – UIGV. Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible- UIGV. Investigaciones publicadas en revistas Indexadas y no Indexadas Investigación ganadora en IV Concurso Nacional del Libro Universitario- 2009 en la ANR. Asesora de Investigaciones Ganadoras de Concurso de Tesis de Posgrado de Maestría 2008 y Doctorado 2012 de Pedro Córdova Mendoza en la ANR.

Misael Aquiles Bendezu Bendezu

aquiles.bendezu@unica.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-6570-2869>



Master in Natural Gas Engineering from UNICA. From 2008 to the present, he is Associate Professor in the Specialty of Environmental and Sanitary Engineering of the Department of Environmental Engineering UNICA-Peru. He has worked in R + D + i research projects in the "Water and wastewater treatment" research line, with stakeholders in water management at the level of hydrographic basins and end user (Palpa River Basin, Pisco River Basin, Laguna de Huaccachina, among others) in alliance with institutions, companies and organizations. Tools: Management of water monitoring, physicochemical and microbiological analysis, plant design and unit operations. PhD Candidate in Environmental Engineering Program.

Cynthia Victoria Bendezu Hernández

bendezucynthia@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8247-8136>

Máster en Procesos Químicos y Ambientales|
Doctorando en la UNALM en Ingeniería.
Docente en la Especialidad de Ingeniería de
Química y petroquímica de la UNICA.
Docente en la especialidad de ambiental y
sanitaria de la UNICA, con sólida experiencia
en investigación y generación de
conocimiento científico. Entrenadora en Transversalización de AbE
para la planificación de desarrollo del MEF. Especialista en saneamiento
ambiental, tratamiento y calidad del agua, gestión de recursos hídricos,
ecohidrología, ecosistemas y medios de vida.



Con participación en proyectos de energías renovables en colaboración
con colegas de la UNALM, valorización de residuos peligrosos y
modelamiento con drones. Además, he contribuido en congresos
internacionales relacionados con recursos hídricos y soy coautora de
artículos de revisión sobre contaminación atmosférica en México y
fitorremediación con plantas nativas. Experta en el uso de software de
modelamiento hidrológico y atmosférico. Actualmente, egresada del
Doctorado en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Manuel Israel Hernández García

israel.hernandez@unica.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-7202-463X>

Docente investigador nombrado, con Grados Académicos de Magister y Doctor, adscrito a la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica. Miembro del Directorio de la SUNEDU.



Isis Cristel Córdova Barrios

isis.cordova@unica.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-3569-2671>

Ing. Ambiental y Sanitaria egresada de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga–Ica. Magister Scientiae en Ingeniería Química con mención en Seguridad Industrial y Ambiental, otorgado por la Universidad Nacional del Altiplano-Puno. Además, es egresada del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Universidad Inca Garcilaso de la Vega. Docente Auxiliar de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria - UNICA. Docente Investigador - UNICA.



Es especialista en Sistemas Integrado de Gestión y Auditora Ambiental. Expositor Nacional e Internacional. Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas.

Félix Ricardo Belli Carhuayo

rbeli@unica.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-2885-8071>

Docente Principal de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga, con grado de Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Investigaciones publicadas en revistas indexadas y ponente en diversos eventos científicos nacionales e internacionales.



Jaime Antonio Martínez Hernández

jaime.martinez@unica.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-6708-4761>

Catedrático Principal de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga, con más de 30 años de experiencia en Ingeniería ambiental. Investigador, Jurado de tesis pregrado y Doctoral. Grado Académico de Bachiller: Ingeniería Química-UNICA-1992- Grado Académico de Magister: Ingeniería Mecánica-



Mención: Energía y Ambiente-UNICA2009. Maestría: Ingeniería de Petróleo, gas natural y Petroquímica-Universidad Nacional de Ingeniería-2009. Grado Académico de Doctor en Gestión Ambiental-UNICA-2017. Doctorado: Ingeniería y Ciencias Ambientales-UNALM-2013-Estudios concluidos. Título Profesional: Ingeniero Químico-UNICA-1992.

Víctor Alberto Candia Palomino

vcandia@unica.edu

<https://orcid.org/0000-0001-7828-9404>

Docente nombrado en la categoría de asociado de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" con el grado académico de Doctor en Gestión Ambiental, dedicado a la investigación en temas ambientales y mineros. Realizo asesoría en optimización de procesos metalúrgicos; diseño, instalación, montaje y puesta en marcha de las operaciones de los procesos metalúrgicos. Con experiencia en evaluación de estudios de procesos metalúrgicos adecuados para diversos minerales.



Dedicatoria

Dedicamos esta investigación a todas las mentes visionarias y comprometidas que trabajan incansablemente por un futuro sostenible. A las generaciones presentes y futuras que heredarán este planeta y que, con su creatividad y determinación, transformarán los desafíos en oportunidades para construir un mundo más limpio, equitativo y resiliente.

Que este trabajo sea una fuente de inspiración para aquellos que buscan en la ciencia no solo respuestas, sino también un propósito que trascienda fronteras y épocas. A la humanidad, que se alza con esperanza frente a los retos del siglo XXI, recordando siempre que cada paso hacia el conocimiento es un paso hacia un futuro más brillante para todos.

Agradecimiento

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que, con su apoyo y confianza, hicieron posible la realización de esta investigación. A nuestras familias, por ser el motor que impulsa nuestra dedicación y perseverancia; a los docentes y mentores que nos guiaron con su sabiduría y visión, sembrando en nosotros el compromiso con la excelencia académica y la responsabilidad social.

A las instituciones académicas y científicas, por proporcionarnos las herramientas necesarias para explorar el conocimiento y contribuir con soluciones a los problemas más urgentes de nuestra era. Agradecemos especialmente a la comunidad de Pisco, Ica, por ser no solo el escenario de este estudio, sino también la inspiración para buscar un equilibrio entre desarrollo industrial y sostenibilidad ambiental.

Nuestro reconocimiento va también a los investigadores que nos precedieron, cuyas contribuciones han sido la base para avanzar en la comprensión de los impactos de la contaminación atmosférica y en la búsqueda de un futuro más limpio y saludable.

Finalmente, dedicamos este agradecimiento a quienes creen en el poder de la ciencia como una herramienta para transformar el mundo. Que este trabajo sea una fuente de inspiración y una llamada a la acción para todos los que, con valentía y determinación, sueñan con un planeta donde el progreso tecnológico y el respeto por la naturaleza convivan en perfecta armonía.

Prólogo

La contaminación del aire es uno de los desafíos ambientales y de salud pública más significativos de nuestro tiempo, especialmente en regiones donde la actividad industrial desempeña un papel clave en el desarrollo económico. El presente estudio, titulado "Aplicación de un Modelo Gaussiano Simplificado para Estimar la Dispersión de PM10 en Áreas Industriales de la Panamericana Sur, Pisco, Ica", se inscribe en este contexto global, destacando la importancia de comprender y gestionar la dispersión de contaminantes atmosféricos para proteger tanto a las comunidades humanas como al entorno natural.

En pleno siglo XXI, el avance científico y tecnológico no solo debe orientarse hacia la innovación, sino también hacia la resolución de problemas que afectan la calidad de vida y la sostenibilidad ambiental. Esta investigación representa un esfuerzo significativo por unir ciencia, tecnología y responsabilidad social, proponiendo una herramienta práctica y accesible para abordar la dispersión de partículas finas PM10, reconocidas por su impacto negativo en la salud respiratoria y cardiovascular. De esta manera, el trabajo realizado no solo busca ser un aporte técnico, sino también un punto de partida para la reflexión ética y el compromiso con las futuras generaciones.

El modelo gaussiano simplificado empleado en este estudio refleja el ingenio y la adaptabilidad que caracterizan a la ciencia moderna. Si bien los modelos simplificados enfrentan retos inherentes a su diseño, su implementación en la región industrial de Pisco, Ica, demuestra su relevancia para generar información precisa y útil, que pueda orientar la toma de decisiones ambientales. Este trabajo no solo mide concentraciones de contaminantes, sino que también ofrece una visión crítica sobre cómo abordar los impactos de la actividad industrial desde una perspectiva preventiva y sostenible.

Asimismo, este estudio dialoga con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, particularmente aquellos relacionados con la salud y el bienestar (ODS 3), la acción por el clima (ODS 13) y la sostenibilidad de las ciudades y comunidades (ODS 11). En un mundo que enfrenta múltiples crisis ambientales, investigaciones como esta reafirman el papel fundamental de la academia en la construcción de soluciones integrales, que equilibren el progreso económico con la conservación del medioambiente.

Más allá de los aspectos técnicos, este trabajo tiene una dimensión inspiradora: busca motivar a las nuevas generaciones de estudiantes e investigadores a explorar problemas complejos con rigor científico y sensibilidad social. La incorporación de herramientas computacionales y enfoques innovadores para evaluar la calidad del aire

marca un camino hacia el fortalecimiento de la investigación ambiental en el Perú y en el mundo.

Finalmente, este documento no solo es un aporte académico, sino también una invitación a la acción colectiva. Al visibilizar el impacto de los contaminantes atmosféricos en áreas vulnerables, se fomenta el diálogo entre diferentes sectores —industrial, gubernamental, académico y comunitario— para diseñar estrategias que promuevan un desarrollo verdaderamente sostenible. En este sentido, el trabajo realizado contribuye al legado de una ciencia que no solo describe problemas, sino que propone soluciones viables y comprometidas con el bienestar del planeta.

Índice

| | |
|--------------------------------|----|
| Semblanza de los autores | 5 |
| Dedicatoria | 13 |
| Agradecimiento | 14 |
| Prólogo | 16 |
| Introducción | 25 |

Capítulo 1

Los contaminantes atmosféricos y su impacto en la calidad del aire

| | |
|---|----|
| 1.1 Calidad del aire | 32 |
| 1.1.1 Normas de calidad ambiental para el aire | 34 |
| 1.2. Polución del aire | 35 |
| 1.2.1 Contaminantes atmosféricos | 39 |
| 1.2.2 Contaminación por partículas suspendidas PM10 provenientes de fuentes industriales | 40 |

Capítulo 2

Dispersión de contaminantes atmosféricos

| | |
|---|----|
| 2.1 Dispersión de contaminantes en la atmósfera, factores que regulan el proceso | 44 |
| 2.1.1 Velocidad del viento con elevación | 46 |
| 2.1.2 Desviación normal en la dirección del viento | 47 |
| 2.2 Modelos de dispersión de contaminantes | 51 |
| 2.2.1 Modelo simplificado Gaussiano | 54 |
| 2.2.2 Modelo gaussiano a nivel del suelo | 56 |
| 2.2.3 Concentraciones máximas a “nivel del suelo” | 59 |

Capítulo 3

Uso del Modelo Gaussiano Simplificado para estimar la dispersión de partículas PM10 en áreas industriales

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1 | Recorrido metodológico | 65 |
| 3.1.1 | Descripción de la Zona de interés para la aplicación del modelo propuesto | 65 |
| 3.1.2 | Supuestos indagatorios y variables de la investigación | 68 |
| 3.1.3 | Definición de las variables | 68 |
| 3.1.4 | Tipo, nivel y diseño de investigación | 73 |
| 3.2 | Población y muestra | 74 |
| 3.3 | Procedimientos técnicos | 75 |
| 3.4 | Resultados | 77 |
| 3.4.1 | Discusión de resultados | 109 |
| | Conclusiones | 112 |
| | Recomendaciones | 114 |
| | Referencias bibliográficas | 116 |
| | Anexos | 126 |

Índice de tablas

| | | |
|---------|---|----|
| Tabla 1 | Normas de calidad ambiental del aire, material particulado en el Perú | 35 |
| Tabla 2 | Condiciones meteorológicas que definen las clases de estabilidad de Pasquill | 47 |
| Tabla 3 | Valores aproximados de σ_y y σ_z , en función de la distancia en la dirección del viento para las distintas clases de estabilidad | 50 |
| Tabla 4 | Valores de las constantes a utilizar en la ecuación en función de la distancia en la dirección del viento y de la condición de estabilidad | 51 |
| Tabla 5 | Variables de estudio | 72 |
| Tabla 6 | Descripción y ubicación en coordenadas UTM de los puntos de monitoreo de calidad de aire | 78 |
| Tabla 7 | Resultado de las estaciones de muestreo de la calidad del aire, meses de julio, agosto y setiembre | 79 |
| Tabla 8 | Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones (Tabla 3). Punto 1 y Punto 2: julio-2024 | 81 |
| Tabla 9 | Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones (Tabla 3). Punto 1 y Punto 2: agosto-2024 | 83 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Tabla 10 | Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones (Tabla 3). Punto 1 y Punto 2: septiembre-2024 | 85 |
| Tabla 11 | Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones de la (Tabla 4), julio-2024 | 90 |
| Tabla 12 | Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones de la (Tabla 4), agosto-2024 | 92 |
| Tabla 13 | Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones de la (Tabla 4), septiembre-2024 | 94 |
| Tabla 14 | Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Empleando nomogramas de Turner, julio-2024 | 99 |
| Tabla 15 | Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Empleando nomogramas de Turner, agosto-2024 | 101 |
| Tabla 16 | Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Empleando nomogramas de Turner, septiembre-2024 | 103 |

Índice de figuras

| | | |
|----------|---|----|
| Figura 1 | Desviación estándar, σ_y en la dirección vertical en función de la distancia del viento | 48 |
| Figura 2 | Desviación estándar, σ_z en la dirección vertical en función de la distancia del viento | 49 |
| Figura 3 | Modelo Gaussiano de columna de humo | 56 |
| Figura 4 | Ubicación del área de influencia del estudio, Panamericana Sur, Pisco-Ica | 67 |
| Figura 5 | Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 8, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur | 82 |
| Figura 6 | Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 9, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur | 84 |
| Figura 7 | Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 10, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur | 86 |
| Figura 8 | Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 11, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur | 91 |
| Figura 9 | Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 12, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur | 93 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 10 | Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 13, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur | 95 |
| Figura 11 | Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 14, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur | 100 |
| Figura 12 | Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 15, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur | 102 |
| Figura 13 | Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 16, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur | 104 |
| Figura 14 | Distribución de t-Student para el monitoreo del PM10, de tres meses. Puntos-1 y Punto.2 | 107 |

Introducción

En la actualidad uno de los desafíos más importantes de los seres humanos, es el control de la contaminación que existe en los centros poblados, donde no escapa la afectación progresiva de la calidad del aire, agravada con el incremento de la actividad industrial y el uso de los recursos naturales en forma indiscriminada.

La industrialización genera indiscutibles beneficios económicos sin embargo, la contaminación atmosférica derivadas de la actividad, sumada a las emisiones de contaminantes que generan otros sectores productivos, impacta negativamente la calidad del aire que respiramos; en el caso del Perú, la aparición y crecimiento de las diferentes ciudades, las expulsiones persistente de gases contaminantes emitidos por el trabajo que realizan las industrias para transformar los productos que se consumen o utilizan, la explosión demográfica, así como el crecimiento del parque automotor que funcionan mediante hidrocarburos de origen fósiles, son algunas de las actividades que contribuyen con el deterioro del ambiente y el cambio climático a nivel local, regional y global.

De esta realidad surge la necesidad de estimar los niveles de contaminación de las ciudades, como base para la definición de medidas de control, en este contexto nace la investigación que sirvió de base para

el desarrollo de presente texto titulado "Modelo Gaussiano simplificado y su aplicación para estimar la dispersión de PM10 de áreas industriales", donde se aborda uno de los problemas críticos en salud pública y medioambiente producto de la contaminación del aire: la dispersión y concentración de partículas finas PM10, emitidas principalmente por actividades industriales, que afectan la calidad del aire y, por ende, la salud de las comunidades cercanas. En un contexto global que busca alinear los avances tecnológicos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, y en este libro se realiza un exhorto a proteger la salud humana, reducir la contaminación y fomentar un planeta verde, saludable y resiliente para las futuras generaciones.

La estructura del texto permite realizar un recorrido sobre aspectos básicos de la dispersión de contaminantes en la atmósfera, la actividad industrial como agravante de problemas ambientales asociados a emisiones fuera de normas y el uso de los modelos de simulación para evaluar el esparcimiento de partículas sólidas en el aire, así como las proposiciones surgidas del análisis de las experiencias consultadas como fundamentos de la investigación central del texto. Al respecto, la temática abordada considera la revisión de la literatura existente sobre el tema, pasando por la explicación detallada del itinerario metodológico utilizado en el abordaje de la investigación de forma sistematizada y organizada. Los resultados obtenidos se analizaron de acuerdo a los protocolos científicos preestablecidos, finalizando la obra con las conclusiones derivadas de la investigación

realizada, así como con algunas recomendaciones para investigaciones futuras en el área de dispersión de contaminantes en la atmósfera.

En consecuencia, este texto constituye un importante aporte al presentar una alternativa para dar respuesta a la necesidad de definir los patrones de dispersión de contaminantes, en especial de las PM10, provenientes de fuentes fijas en áreas industrializadas, el cual es considerado como uno de los principales contaminantes que afectan la calidad del aire. Su contenido se distribuye en los siguientes apartados:

Capítulo I. Los contaminantes atmosféricos y su impacto en la calidad del aire. En este apartado se realiza una breve discusión sobre la calidad del aire, las normas ambientales que regulan la materia, así como el abordaje de la problemática asociada a la contaminación de este vital recurso, sus efectos negativos sobre los seres vivos. Mención importante la constituye los contaminantes atmosféricos incluyendo las partículas PM10 las cuales representan una de las emisiones que más preocupación genera debido a sus efectos nocivos sobre la salud humana y el ambiente.

Capítulo 2. Dispersión de contaminantes atmosféricos. Contempla una descripción del fenómeno de la dispersión, los factores que intervienen en el proceso, adicionalmente se aborda la importancia de los modelos de dispersión de contaminantes analizándose la variable que requiere al modelo gaussiano simplificado, contándose entre estas

variables la velocidad y dirección del viento, y las características de las fuentes emisoras.

Capítulo 3. Uso del modelo Gaussiano Simplificado para estimar la dispersión de partículas PM10 en áreas industriales. Este capítulo constituye el eje central del texto donde se presenta en detalle la aplicación de la propuesta del modelo precitado para evaluar las emisiones de partículas PM10 desde fuentes estacionarias, provenientes de las industrias establecidas en la zona de la carretera Panamericana Sur en la región de Pisco, un área de importante actividad industrial en Perú.

La elección de este modelo obedece a su eficacia y precisión para prever la concentración de contaminantes a nivel del suelo, proporcionando así una herramienta accesible y valiosa para evaluar el impacto de estas emisiones en el aire, así como los vectores del recorrido de la emisión de gases contaminantes. Al obtener un mapeo detallado de la dispersión de PM10, se espera aportar información relevante para la implementación de políticas ambientales y establecer medidas preventivas que minimicen los riesgos para la salud pública y el ambiente local.

El recorrido investigativo que emerge de las indagaciones de las particularidades de la ciudad de Ica, recorre el itinerario metodológico basado en el modelo de dispersión gaussiano, adaptado para simular la propagación de partículas en función de las condiciones meteorológicas

y las características de las fuentes de emisión. El mismo permite calcular la concentración de PM10 en diferentes puntos geográficos, considerando factores como la velocidad del viento, la altura de las chimeneas industriales y la estabilidad atmosférica.

La utilización de estaciones meteorológicas y herramientas de análisis computacional ha sido clave para asegurar la precisión de los datos recolectados y la confiabilidad de los resultados obtenidos. Sin embargo, como en toda modelación ambiental, esta metodología enfrenta ciertas limitaciones relacionadas con la variabilidad de las condiciones meteorológicas y las restricciones inherentes a los modelos simplificados, que pueden afectar la exactitud de las proyecciones en escenarios complejos.

A través de los análisis e indagaciones que se realizaron, se busca inspirar a las nuevas generaciones a adoptar enfoques científicos y tecnológicos en la búsqueda de soluciones para los problemas ambientales, alineándose con los objetivos de una universidad comprometida con el desarrollo sostenible en el siglo XXI. Al avanzar en el conocimiento sobre la dispersión de contaminantes atmosféricos, esta investigación pretende contribuir a la construcción de un planeta más limpio y saludable, promoviendo no solo la mejora de la calidad del aire, sino también un modelo de desarrollo que equilibre el progreso económico con el respeto al medioambiente y la salud de la población.

Capítulo 1

Los contaminantes atmosféricos y su impacto en la calidad del aire



1



Capítulo 1

Los contaminantes atmosféricos y su impacto en la calidad del aire

Como elemento básico para la vida, el aire debe mantener una composición ideal o cercana a la misma. Cuando esta composición no es adecuada, entonces esta función primigenia del aire se pierde, de allí que uno de los principales objetivos de la gestión ambiental tanto de instituciones públicas, entes del Estados y empresas privadas, debe girar en torno a la conservación de la calidad del aire, considerando las medidas necesarias para controlar las descargas de contaminantes a la atmósfera y así proteger la salud no solo de las personas, sino también mantener el equilibrio de los ecosistemas ya que controles laxos o inexistentes de las emisiones de gases con efecto invernadero han sido el preludeo del cambio climático que estamos experimentando y ampliamente documentados por diferentes investigadores.

[...] los niveles de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera continúan aumentando a un ritmo alarmante, esto no solo amenaza el equilibrio ambiental de nuestro planeta, sino

que también tiene profundos impactos en la economía, la salud y la seguridad de las comunidades de todo el mundo. (Martínez et al., 2024, p. 37)

Por ello es muy importante precisar los mecanismos necesarios para la conservación de la calidad del aire lo más puro posible o por lo menos con una composición tolerable para los seres vivos, lo cual es una materia que implica la revisión de las actuaciones de los seres humanos en cuanto a sus actividades y en las formas de minimizar los impactos contaminantes en el ambiente. Pero, ¿qué entendemos por calidad de aire?, ¿cuáles son los principales contaminantes atmosféricos? En este capítulo estaremos enunciando estos aspectos básicos como una modesta contribución, para introducir el tema del mundo de la contaminación atmosférica.

1.1 Calidad del aire

La calidad del aire puede definirse como el grado o nivel en el que el medio aéreo o gases que conforman la atmósfera terrestre se encuentran libre de sustancias contaminantes (Sofán et al., 2023). Su importancia es fundamental, debido a que influye de manera positiva o negativa sobre los seres vivos, dependiendo de su pureza (Ambuludi y Carvajal, 2022). Para determinar en qué medida el aire está libre de contaminantes es necesario tener patrones de comparación pre establecidos que permiten calificar la calidad del aire en una zona en particular, para ello se emplean los “Estándares de Calidad del Aire

(ECA)”, los cuales son criterios empleados para analizar la calidad del entorno natural. Estos estándares se establecen a partir de la evaluación de la cantidad de elementos, sustancias u otros componentes detectados en el aire. Estas cantidades representan las concentraciones de elementos en el aire, las cuales se miden generalmente en unidades de masa, como microgramos o nanogramos por gramo o kilogramo ($\mu\text{g/g}$ o ng/g), o en unidades de volumen, como microgramos o nanogramos por metro cúbico ($\mu\text{g/m}^3$ o ng/m^3), (Vara, 2005).

Las concentraciones pueden ser medidas a través de los *monitoreos* en sitios y tiempos determinados los cuales consisten en una serie de procedimientos o actividades que involucra la observación, toma de muestras, medición y análisis de datos técnicos y ambientales” con el “objetivo de determinar las características del entorno o medio ambiente, identificar los efectos ambientales de las actividades en un sector específico, y detectar cualquier variación o cambio a lo largo del tiempo” (Ballesteros, 2023).

Concentración de 24 horas. Vara (2005) indica que la concentración media se determina al considerar los valores medidos de manera continua durante “un período de 24 horas en cada estación de monitoreo”. En caso de utilizar monitores con una resolución temporal menor a 24 horas o si hay una pérdida parcial de información horaria, se tomará en cuenta un tiempo igual o superior a 18 horas para calcular el promedio.

1.1.1 Normas de calidad ambiental para el aire

La calidad del aire es normada a nivel nacional e internacional con la finalidad de establecer los límites máximos de concentración de contaminantes que “se permiten” en el aire sin que estos afecten la salud de la población y especialmente los grupos de mayor vulnerabilidad. En Perú esta materia está regulada por las siguientes normativas:

Ley General del Ambiente (Ley N°28611, LGA). Establece que toda persona tiene derecho a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y tiene el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, “así como a sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y desarrollo sostenible del país” (MNAN, 2017). Además “hace referencia a que todos los proyectos nuevos deberán mantener sus emisiones por debajo del valor establecido en el D.S. N°003-2017-MINAM (20 ug/m³)”(MINAM, 2017).

Decreto Supremo N°003 – 2017 - PCM Estándares nacionales de calidad ambiental del aire. Este reglamento establece los estándares nacionales de calidad ambiental del aire para el País. “Además, indica los planes de acción para mejorar la calidad del aire con el fin de establecer las estrategias, políticas y medidas necesarias para alcanzar los estándares primarios de calidad del aire en un plazo determinado”

(MINAM, 2017), incluyendo los contenidos del material particulado, objeto de estudio de este texto (Tabla 1).

Tabla 1

Normas de calidad ambiental del aire, material particulado en el Perú.

| Parámetros | Periodo | Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Criterio de evaluación | Método de análisis* |
|---|----------------|--|-----------------------------------|--|
| Material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM10) | 24 horas | 100 | NE más de 7 veces al año | Separación inercial/filtración (Gravimetría) |
| | Anual | 50 | Media aritmética anual | |

Nota. * Valor de concentración en microgramos por metro cúbico. NE significa “No Exceder”. Fuente: MINAM, 2017.

1.2. Polución del aire. Cuando la determinación de la calidad del aire presenta variaciones que implica cambios en su composición por la presencia de elementos o energías perjudiciales que representan un riesgo o daño para los seres humanos, el entorno natural y las propiedades estamos en presencia de una contaminación o polución del aire (Vara, 2005).

Esta problemática constituye un reto para la supervivencia de los seres humanos en el planeta, dado que la contaminación del aire puede tener consecuencias irreversibles si no se toman las medidas para prevenirla o minimizarla. La polución atmosférica es un fenómeno que introduce una variedad de agentes contaminantes en la atmósfera, generando impactos perjudiciales tanto para los seres humanos como

para otros organismos vivos, así como para el entorno natural (Tuna et al., 2021). Aunque puede provenir de fuentes naturales, cada vez son más notables los efectos derivados de actividades antrópicas que generan contaminantes que modifican la calidad del aire e impactan la salud de los seres vivos, la dinámica de los ecosistemas e incluso la estabilidad de materiales.

La investigación sobre la polución atmosférica ha adquirido una relevancia destacada en todos los ámbitos, motivada por el crecimiento de las actividades humanas y los cambios climáticos asociados, que emergen como consecuencia del acelerado proceso de industrialización, tanto en países ya desarrollados como en aquellos que se encuentran en vías de desarrollo a nivel global. Es una de las principales razones que contribuye al menoscabo de las condiciones de salud humana se manifiesta al equiparar la respiración de aire saludable con la importancia de la ingesta de agua y alimentos seguros (Tiyovenda et al., 2021).

Las repercusiones en la salud derivadas de la polución atmosférica, ya sea en entornos cerrados o al aire libre, han suscitado una significativa inquietud debido al riesgo sustancial de exposición, incluso ante concentraciones relativamente modestas de agentes contaminantes del aire (Kim et al., 2015). De datos referidos por Tuna et al. (2021), se calcula que anualmente se registran más de dos millones de fallecimientos a nivel global como resultado directo de la

contaminación atmosférica, manifestándose a través de lesiones en los pulmones y el sistema respiratorio.

De acuerdo a investigación realizada por Sharma et al. (2011), la polución no se presenta como un problema aislado, sino más bien como un conjunto interrelacionado de problemáticas con diversos efectos. Dichos efectos varían según la duración de la exposición al aire contaminado, siendo esta la variable determinante de sus impactos perjudiciales. Por ende, al abordar los agentes o materiales contaminantes, es esencial hacer referencia tanto a la cantidad como al período de tiempo correspondiente para evaluar de manera precisa sus efectos. De igual manera, la polución se propaga o dispersa a través de la circulación de las masas de aire, las cuales son transportadas a grandes distancias por los vientos.

La Organización Mundial de la Salud [OMS] (2016) destaca que la “polución atmosférica ha evolucionado para convertirse en la principal amenaza ambiental para el bienestar”. Adicionalmente, señala que se han alcanzado niveles de deterioro de la calidad del aire tan pronunciados en el entorno que sus consecuencias adversas pueden generar un impacto significativo en la salud y el bienestar de los individuos. “Estos agentes contaminantes no solo impactan la salud humana y animal, sino que también ocasionan deterioro en la vegetación y los materiales, disminuyen la visibilidad y la radiación solar, y ejercen influencia sobre las condiciones meteorológicas y climáticas” (OMS, 2016).

La evaluación de las emisiones atmosféricas originadas por fuentes de combustión estáticas se presenta como una imperativa en la administración de la pureza atmosférica en las ciudades. En el caso de la ciudad de Cuenca se realizó una investigación para contar con datos precisos en el inventario de emisiones, proporcionando información esencial para evaluar el impacto que afecta de manera evidente tanto la salud humana como el ecosistema, a través del recurso vital que es el aire. Moscoso et al. (2018) quienes llevaron a cabo dicha investigación señalan que “El propósito fundamental de la investigación consistió en la medición y cálculo de las emisiones atmosféricas correspondientes a los contaminantes más significativos provenientes de instalaciones estacionarias de procesos de combustión”.

Bustillos (2011), en su investigación de la contaminación causada por las chimeneas de las industrias existentes en la región de Ambato, clasificadas como fuentes fijas indica que “La contaminación atmosférica en los últimos años se ha convertido en uno de los principales problemas ambientales, debido entre otros muchos factores a desastres naturales y al impacto de las actividades antropogénicas”. Destaca este investigador los “aspectos que han producido un efecto perjudicial en la calidad del aire y que han provocado la preocupación de la sociedad y de sus autoridades”.

Todas estas experiencias reflejan la importancia y necesidad de estudiar los contaminantes atmosféricos, con énfasis a los originados por descargas o emisiones de fuentes fijas. Los impactos que estas emisiones

generan sobre la calidad del aire se ven reflejados en la variación de las concentraciones de sus componentes, así como en las consecuencias para las comunidades cercanas, donde son frecuentes las denuncias de los habitantes quienes las asocian con problemas de salud entre ellos afecciones respiratorias y en la piel, de igual manera se afectan los ecosistemas que pueden verse alterados con las emisiones anormales de contaminantes.

1.2.1 Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes medioambientales son muy numerosos; algunos son sustancias que se encuentran de forma natural en la atmósfera. Se les considera contaminantes cuando sus concentraciones son más elevadas que las de una situación calificada como “normal” (Cardona et al., 2020).

De acuerdo a su procedencia, considerando el proceso de formación de la sustancia, los contaminantes pueden clasificarse en primarios y secundarios (Rice et al., 2021). Los primeros son sustancias contaminantes que se vierten, directamente a la atmósfera, procedentes tanto de fuentes de emisión fijas como de móviles. Se caracterizan por encontrarse en la misma forma química que en los focos emisores y dan lugar a lo que se conoce como contaminación convencional (por ejemplo: SO₂, H₂S, NH₃, CO, HCl, PST) a diferencia de los secundarios que son el resultado de diferentes reacciones ocurridas en

la atmósfera a partir de contaminantes primarios, (entre otros: O₃, SO₃, H₂SO₄).

1.2.2 Contaminación por partículas suspendidas PM10 provenientes de fuentes industriales

Dentro de los contaminantes del aire, las partículas suspendidas, especialmente PM10, constituye una preocupación crítica en el ámbito regional, nacional y global debido a sus efectos nocivos sobre la salud humana y el ambiente. A nivel mundial, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha identificado la contaminación del aire como el mayor riesgo ambiental para la salud, señalando que más del 90% de la población mundial respira aire que excede los límites de calidad recomendados (OMS, 2024). Este problema se intensifica en zonas industrializadas y urbanas, donde las emisiones de partículas PM10 provenientes de fuentes estacionarias, como las chimeneas industriales, contribuyen significativamente a la degradación de la calidad del aire (Dai et al., 2015).

En el contexto de América Latina, el crecimiento industrial sin controles rigurosos sobre las emisiones atmosféricas ha exacerbado la contaminación del aire, lo que se traduce en un incremento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en la población expuesta. Estudios recientes muestran que, en países con escasas políticas de monitoreo y control, los efectos de la contaminación del aire son aún

más severos, afectando principalmente a los sectores vulnerables y a las poblaciones cercanas a fuentes industriales (Husaini et al., 2022).

En Perú, las concentraciones de PM10 en zonas industriales han superado los *Estándares de Calidad Ambiental (ECA)* establecidos, particularmente en regiones de rápido crecimiento económico como Pisco e Ica. Estas áreas se ven especialmente afectadas por las actividades industriales, que incluyen la combustión de combustibles fósiles, aumentando la emisión de partículas finas y gruesas que representan riesgos tanto para la salud de los habitantes como para los ecosistemas locales. Según el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2017), ciudades como Lima y Arequipa ya registran concentraciones de PM10 por encima de los niveles aceptables, lo cual sirve como indicativo del potencial de incremento en otras zonas con un crecimiento industrial acelerado (Rojas et al., 2022).

Por lo expresado anteriormente, las actividades industriales deben mantener controles eficientes que garanticen que las emisiones de contaminantes hacia la atmósfera provenientes de sus fuentes fijas sean mínimas y sobre todos, sus valores estén dentro de los estándares establecidos por las normas ambientales que regulan la materia. Esto además de minimizar los impactos ambientales que estos contaminantes generan, representa un aval de la responsabilidad ambiental del sector industrial, disminuyendo las posibilidades de querellas y demandas con los habitantes y sectores ambientalistas y en especial sanciones emitidas por el Órgano Rector Ambiental.

Capítulo 2

Dispersión de contaminantes atmosféricos

A large, stylized number '2' is positioned on the right side of the page. The number is dark blue and is set within a white diamond shape. This diamond is part of a larger graphic design consisting of overlapping, semi-transparent geometric shapes in shades of teal and grey, creating a modern, layered effect.

2



Capítulo 2

Dispersión de contaminantes atmosféricos

Las columnas de humos y los penachos de las chimeneas descargan contaminantes a la atmósferas que pueden “viajar” distancias considerables afectando superficies ubicadas en sitios distantes de los puntos de emisión. Esta dispersión de contaminantes está determinada por una serie de factores que influyen sobre el área y grado de afectación. Para definir su área de impacto se requieren estudios y mediciones considerando entre otros factores, las condiciones climáticas, las características de las emisiones, ubicación y altura del punto de emisión o descarga del contaminante y de la capa de mezclado. Quintero y Fares (2023) han realizado advertencias acerca de esta tipología de contaminación, las cuales agravan las vías respiratorias, los poros en la piel y demás órganos cuya prevalencia puede ser incluso, mortal. En este capítulo se disertará sobre la dispersión de emisiones atmosféricas y de la versatilidad de los modelos utilizados para caracterizarlas.

2.1 Dispersión de contaminantes en la atmósfera, factores que regulan el proceso

La dispersión de contaminantes en la atmósfera es un proceso mediante el cual una sustancia o elemento contaminante se propaga desde un punto de liberación hacia el aire circundante. Los factores meteorológicos que influyen de manera directa en la dispersión de estos contaminantes son: la velocidad y dirección de los vientos, la temperatura, la humedad, la turbulencia y la estabilidad atmosférica (Castañeda y Santana, 2022).

La contaminación por humo está considerada perniciosa para la salud humana, porque puede propagarse y consumirse, específicamente por las vías respiratorias, afectando los organismos vivos, por la exposición a este tipo de eventos, las empresas e industrias que la producen, deben buscar mecanismos para minimizar sus impactos contaminantes (Muñoz et al., 2021).

Muchas personas se ven involucradas en ambientes nocivos o con contaminantes en el aire por periodos prolongados de tiempo, lo que a su vez se ve reflejado en problemas de la salud sobre todo referentes al sistema respiratorio, lo que hace imprescindible determinar la calidad del aire en el ambiente al que se exponen diariamente estas personas, ya que la misma puede verse seriamente afectada por presencia de polvo, gases y otros contaminantes que pueden producir

gérmenes y los mismos se esparcirán en el ambiente (Coronel y Toasa, 2024, p. 2635).

Conocer de manera exhaustiva lo que sucede e implica la contaminación atmosférica es imprescindible para la aplicación de políticas que coadyuven a su control o minimización (Bello y Reyes, 2021). Este proceso está determinado principalmente por tres factores:

- a. El movimiento horizontal del aire que transporta el contaminante.
- b. Las fluctuaciones turbulentas por los movimientos verticales aire.
- c. La difusión de masa debido al gradiente de concentración.

La turbulencia, representada por remolinos horizontales y verticales, emerge como un componente fundamental que mezcla los contaminantes con el aire circundante. En el contexto de una columna de humo, desempeña un papel dual: disminuye la concentración de contaminantes en la pluma mientras aumenta la concentración en el aire circundante.

La intensidad de la turbulencia, un indicador clave, influye directamente en la rapidez con la que los contaminantes se dispersan. Esta dinámica es especialmente pronunciada en una atmósfera inestable, donde el movimiento vertical se ve mejorado, siendo el verano en un día soleado y claro en la tarde un ejemplo paradigmático. En contraste,

cuando la turbulencia es débil, se establece un ambiente más estable, caracterizado por una dispersión más lenta de contaminantes. Esta situación se manifiesta con mayor fuerza en un claro día de invierno, particularmente en las primeras horas de la mañana, como en el amanecer.

Reconocer estas variaciones en la turbulencia es esencial para comprender la dinámica atmosférica, permitiendo así desarrollar estrategias efectivas para abordar y mitigar la contaminación atmosférica, salvaguardando de esta manera, la pureza del aire y, en última instancia, la salud y bienestar de la población.

Además de los factores señalados, para Brusca et al. (2015), la interacción de la pluma continua liberada de fuentes puntuales con edificios y otras estructuras es el factor principal que afecta la dispersión a corto alcance de los contaminantes atmosféricos en las áreas urbanas. Al respecto sugieren la necesidad del uso de algunos estudios de campo y experimentos en túnel de viento para explicar mejor esta interacción.

2.1.1 Velocidad del viento con elevación

Para estudios de emisiones de fuentes fijas “La velocidad del viento utilizada se corresponde con la velocidad a la altura efectiva de la columna o chimenea”. La medición de la velocidad del viento se puede realizar mediante la estación meteorológica Vantage Vue de Davis Instruments, posicionada a una altitud de 2,5 metros sobre la

superficie terrestre. Además, se debe considerar la estabilidad atmosférica (Tabla 2).

Tabla 2

Condiciones meteorológicas que definen las clases de estabilidad de Pasquill.

| Velocidad del viento | Día, radiación solar | | | Noche | |
|----------------------|----------------------|----------|-------|-------------|-------------|
| | Fuerte | Moderado | Débil | Nubes > 1/2 | Nubes < 3/8 |
| < 2 | A | A – B | B | E | F |
| 2 – 3 | A - B | B | C | E | F |
| 3 – 5 | B | B – C | C | D | E |
| 5 – 6 | C | C – D | D | D | D |
| > 6 | C | D | D | D | D |

2.1.2 Desviación normal en la dirección del viento

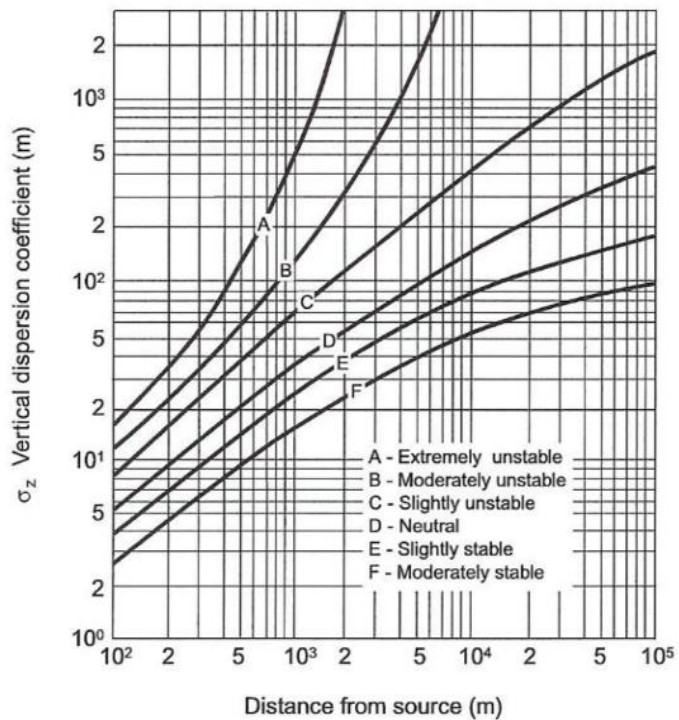
Al calcular la dispersión de gases procedente de una fuente específica, generalmente se seleccionará la categoría de permanencia atmosférica más representativa de la región, lo cual conduce al escenario más desfavorable en términos de contaminación. Esto se debe al tamaño reducido de las Figuras 1 y 2, según lo presentado por Turner (2014). La interpretación precisa de los valores de σ_y y σ_z en estos gráficos presenta dificultades. Sin embargo, para evitar pérdidas de precisión, se puede recurrir a fuentes originales como la Tabla 3, que ofrece valores aproximados de σ_y y σ_z en relación con la distancia a favor del viento para distintas categorías de estabilidad, expresados en metros.

Asimismo, la Tabla 4, proporciona constantes a emplear en la ecuación, también en relación con la distancia a favor del viento y la

condición de estabilidad, ofreciendo una lista de valores de σ_y y σ_z para las seis categorías de estabilidad, teniendo en cuenta distancias a favor del viento, seleccionadas de manera arbitraria.

Figura 1

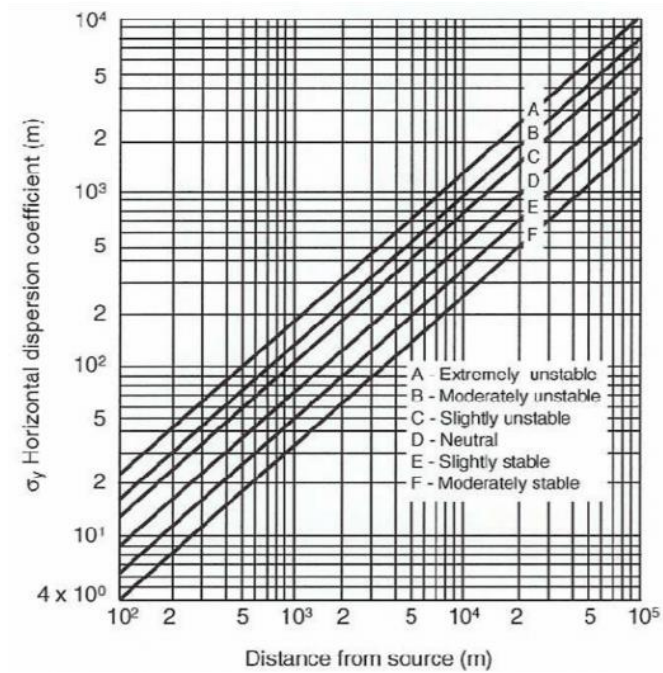
Desviación estándar, σ_y en la dirección vertical en función de la distancia del viento.



Nota. Adaptado de Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, por D.B. Turner, 1969

Figura 2

Desviación estándar, σ_z en la dirección vertical en función de la distancia del viento.



Nota. Adaptado de Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, por D.B. Turner, 1969

Tabla 3

Valores aproximados de σ_y y σ_z , en función de la distancia en la dirección del viento para las distintas clases de estabilidad.

| Distancia (Km) | Clases de estabilidad y valores de σ_y | | | | | | Clases de estabilidad y valores de σ_z | | | | | |
|-------------------|---|------|------|------|-----|-----|---|------|-----|-----|-----|----|
| | A | B | C | D | E | F | A | B | C | D | E | F |
| 0.1 | 27 | 19 | 13 | 8 | 6 | 4 | 14 | 11 | 7 | 5 | 4 | 2 |
| 0.2 | 50 | 36 | 23 | 15 | 11 | 8 | 29 | 20 | 14 | 8 | 6 | 4 |
| 0.4 | 94 | 67 | 44 | 29 | 21 | 14 | 72 | 40 | 26 | 15 | 11 | 7 |
| 0.7 | 155 | 112 | 74 | 48 | 36 | 24 | 215 | 73 | 43 | 24 | 17 | 11 |
| 1.0 | 215 | 155 | 105 | 68 | 51 | 34 | 455 | 110 | 61 | 32 | 21 | 14 |
| 2.0 | 390 | 295 | 200 | 130 | 96 | 64 | 1950 | 230 | 115 | 50 | 34 | 22 |
| 4.0 | | 530 | 370 | 235 | 180 | 120 | | 500 | 220 | 77 | 49 | 31 |
| 7.0 | | 880 | 610 | 400 | 300 | 200 | | 780 | 360 | 109 | 66 | 39 |
| 10.0 | | 1190 | 840 | 550 | 420 | 275 | | 1350 | 510 | 135 | 79 | 46 |
| 20.0 | | 2150 | 1540 | 1000 | 760 | 500 | | 2900 | 950 | 205 | 110 | 60 |

Tabla 4

Valores de las constantes a utilizar en la ecuación en función de la distancia en la dirección del viento y de la condición de estabilidad.

| Estability | X < 1 km | | | | X > 1 km | | |
|------------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | a | c | D | f | c | d | f |
| A | 213 | 440.8 | 1.941 | 9.27 | 459.7 | 2.094 | -9.6 |
| B | 156 | 106.6 | 1.149 | 3.3 | 108.2 | 1.098 | 2.0 |
| C | 104 | 61.0 | 0.911 | 0 | 61.0 | 0.911 | 0 |
| D | 68 | 33.2 | 0.725 | -1.7 | 44.5 | 0.516 | -13.0 |
| E | 50.5 | 22.8 | 0.678 | -1.3 | 55.4 | 0.305 | -34.0 |
| F | 34 | 14.35 | 0.740 | -0.35 | 62.6 | 0.180 | -48.6 |

2.2 Modelos de dispersión de contaminantes

Las ecuaciones matemáticas, denominados también modelos matemáticos, son de uso cotidiano en las áreas de ingeniería ambiental, química y edafología, que facilitan realizar estimaciones o predicciones sobre alguna magnitud o contaminante, como el humo, y mediante operaciones matemáticas se ejecutan apreciaciones sobre los impactos y afectaciones naturales y en los humanos.

Estos modelos, dependiendo de la inclusión de los diversos factores que afectan a un fenómeno físico o químico, serán más o menos complejos. Una característica que presenta un modelo y que permite seleccionar para aplicarlo en la determinación de alguna magnitud física o química, es el error que comete en la estimación de la variable o magnitud. (Espinoza y Jiménez, 2024, p. 7)

En el caso de la dispersión de emisiones, estos modelos matemáticos permiten hacer estimaciones de la concentración de un contaminante en la atmósfera según un conjunto amplio de variables que interfieren en el proceso. Para su desarrollo principalmente se requiere información sobre las fuentes y las condiciones meteorológicas del área para calcular cómo estos se mueven a través de la atmósfera así como su concentración en puntos específicos.

El desarrollo y uso de estos modelos contribuye a una mejor comprensión de la dinámica de los contaminantes atmosféricos en zonas industrializadas. Además, resulta clave en el esfuerzo por cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular con el ODS 3 (Salud y Bienestar) y el ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), que abogan por mejorar la calidad del aire urbano y reducir la exposición de la población a contaminantes peligrosos (Nakhle et al., 2024).

Brusca et al. (2015) analizaron la dispersión, transporte e interacción con edificios u obstáculos de partículas e indicaron que se pueden modelar de varias formas”. Los investigadores Balakrishnaiah et al. (2014) indican que muchos estudios sobre modelos de dispersión de la contaminación se han centrado en entornos a gran escala. En estos casos, cuando los obstáculos o las dimensiones de los edificios son insignificantes en comparación con la sección transversal de la pluma dispersante, generalmente se utilizan modelos de dispersión convencionales, como los modelos gaussianos propuesto por (Onat et

al., 2004), entre otros o los modelos lagrangianos referidos por (Gariazzo et al., 2007) “para simular los flujos y patrones de dispersión”.

Las simulaciones realizadas a través de estos modelos tienen importantes aplicaciones, entre ellas:

- a) Estudios de línea base de calidad del aire para evaluar las condiciones del área antes del inicio de un proyecto o actividad operacional.
- b) Estudio de emisiones y calidad del aire durante la ejecución de operaciones de una determinada instalación industrial.
- c) Definición de áreas sensibles y áreas contaminadas como parte de la planificación territorial.
- d) Identificación de focos de emisión, previo a la propuesta de medidas correctoras.
- e) Elaboración de inventarios de emisiones.
- f) Diseño de planes de acción.
- g) Cálculo de alturas de chimenea. (Omonte y Romero, 2020)

En el caso del modelo gaussiano simplificado su aplicación resulta fundamental para estimar la concentración de PM10 y su propagación en el ambiente, permitiendo así la creación de estrategias más efectivas para la gestión y mitigación de las emisiones, premisa compartida por diversos autores entre ellos (Bahlali y Petit, 2024; Pasquill, 1979),

De igual manera los investigadores Tyovenda y Sombo (2021), presentaron un modelo gaussiano modificado simple y fácil de usar, que requiere pocos parámetros de entrada. El modelo se utilizó para predecir patrones de dispersión de contaminantes gaseosos (CO y NO₂). Buscaban medir la contribución de la chimenea a la contaminación del aire ambiente y evaluar los posibles efectos sobre la salud humana.

En otra experiencia reportada por Meléndez y Valdez (2015) se presentan conclusiones emanadas de la modelación gaussiana donde muestran el impacto generado por las chimeneas vinculadas a los calderos 17 y 20 de la empresa Cartavio S.A.A., en las áreas adyacentes, abarcando sectores específicos “de la ciudad de Cartavio, el sector El Ingenio, así como los campos agrícolas al Norte”. En estos lugares, se observa el impacto de las emisiones provenientes de dichas chimeneas, proporcionando una representación detallada de la dispersión de contaminantes en la región circundante. Continúan los investigadores, “concluye que la empresa ha mejorado su desempeño ambiental, al disminuir sus emisiones y por ende su impacto sobre la calidad del aire de sus colindantes”, cabe resaltar que sus emisiones no sobrepasan los ECAs según los datos analizados.

2.2.1 Modelo Simplificado Gaussiano

La aplicación de un modelo gaussiano simplificado en la estimación de la dispersión de emisiones, es una valiosa herramienta para la evaluación y gestión de la calidad del aire. Estos modelos

permiten simular cómo los contaminantes, como el PM10, se dispersan en la atmósfera, tomando en cuenta factores como la velocidad y dirección del viento, la topografía del área y las características de las fuentes emisoras. El modelo gaussiano es ampliamente utilizado por su capacidad para representar de manera eficiente los patrones de dispersión de contaminantes, siendo especialmente relevante en áreas industriales donde las emisiones de partículas finas son elevadas. Este modelo ofrece una forma accesible y efectiva para estimar la dispersión de contaminantes en entornos complejos como el de la Panamericana Sur, Pisco, Ica.

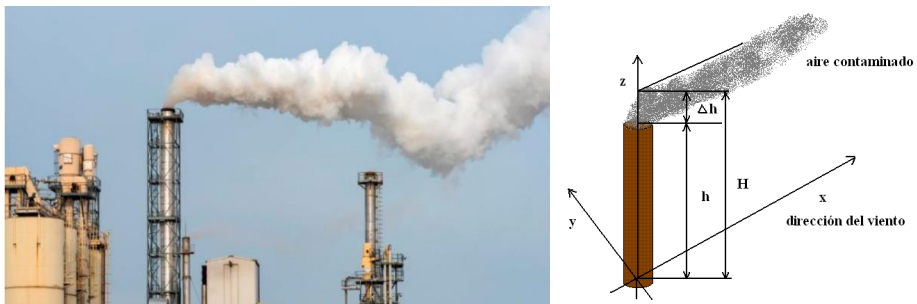
Para Turner (2014), este modelo, intrínsecamente vinculado a la velocidad media del viento y a las características de la turbulencia atmosférica, desempeña un papel crucial en la determinación de la calidad del aire. Además, de incluir las variables anteriormente indicadas (velocidad y la dirección del viento), considera la altura de las chimeneas industriales y la estabilidad atmosférica, factores que afectan significativamente la dispersión de los contaminantes y, por ende, determinan los puntos de máxima concentración de PM10 en las zonas cercanas.

Cabrera (2012) explica el fenómeno de la dispersión a través de este modelo señalando que en la medida que la pluma de contaminantes progresa en la dirección del viento, el modelo gaussiano supone que el perfil de concentración por mezcla turbulenta adquiere una distribución gaussiana, por otra parte, refiere que, si la condición atmosférica es

neutra, entonces se desarrollará una pluma en forma de cono. La concentración en la línea central de la pluma será máxima a una distancia cercana del foco emisor y disminuirá en la dirección viento abajo. A medida que la distancia viento abajo aumenta, los extremos de la pluma pueden impactar sobre el terreno tal y como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Modelo Gaussiano de columna de humo



2.2.2 Modelo gaussiano a nivel del suelo

Según Wark y Warner (2012), el enfoque más integral de la teoría del transporte se fundamenta en el "modelo de difusión turbulenta", el cual incorpora el concepto de "longitud de mezcla". Esta dimensión sirve como el punto de partida más elemental en la concepción de un modelo de dispersión en la atmósfera. Aunque la ecuación fundamental de este modelo presenta una complejidad matemática considerable, al realizar suposiciones simplificadoras, es posible simplificar su forma de manera significativa:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_{xx} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) + K_{yy} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + K_{zz} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ecu. (1)}$$

La formulación de transporte, representada por la ecuación (1), se deriva del modelo de difusión turbulenta, utilizado para estudiar la dispersión de contaminantes en la atmósfera, y se identifica comúnmente como la ecuación de Fick. Al aplicar el modelo gaussiano a este escenario, se realizan los siguientes supuestos:

- a. “La concentración de contaminantes emana de una fuente puntual continua”.
- b. “El proceso está en estado estacionario, es decir, $\partial C/\partial t = 0$ ”.
- c. “El eje (x) está alineado con la dirección del viento”.
- d. “La velocidad del viento (u) es constante en cualquier punto del sistema de coordenadas x, y, z”.
- e. “El transporte de contaminantes debido al viento en la dirección x predomina sobre la difusión descendente, es decir, $u(dC/dx) \gg K_{xx}(\partial^2 C/\partial x^2)$ ”
- f. Ninguna reacción química o, equivalentemente, la especie modelada se considera inerte. Según Brusca et al, 2015, la mayor ventaja de los modelos de pluma gaussiana es que tienen un tiempo de respuesta extremadamente rápido, casi inmediato. Su cálculo se basa únicamente en resolver una única fórmula para cada punto receptor, y el coste computacional del modelo consiste principalmente en el pre

procesamiento de datos meteorológicos y la parametrización de turbulencias.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zv} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{(z-L)^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad \text{Ecu. (2)}$$

Utilizando la ecuación (2) desarrollada, se busca determinar tanto la ubicación y la concentración máxima previsible “en la línea central, a nivel del suelo, para una fuente puntual elevada”.

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zv} \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad \text{Ecu. (3)}$$

Para este propósito, se emplea $C(x, 0,0)$ conforme a la ecuación (3). En este contexto, se consideran las siguientes condiciones y suposiciones:

- “La tasa de emisión de la fuente (Q) permanece constante”.
- “La dispersión (difusión) es despreciable en la dirección del viento”.
- “Las condiciones meteorológicas horizontales se mantienen homogéneas en el espacio modelado”.
- “La velocidad del viento mantiene su constancia”.
- “La altura de la fuente de emisión es invariable”.
- “No hay cizalladura del viento, ni en el plano horizontal ni en el vertical”.

- “Los contaminantes bajo consideración son gases no reactivos”.
- “La columna de contaminantes se refleja en la superficie sin experimentar deposición ni reacción con la misma”.

2.2.3 Concentraciones máximas a “nivel del suelo”

Para Kim et al. (2015), el material particulado (PM) es el parámetro clave de las redes de monitoreo de la calidad del aire debido a su efecto sustancial en la salud humana, el clima y el medio ambiente. Las observaciones terrestres de PM pueden proporcionar concentraciones distribuidas espacial y temporalmente en los centros urbanos, ya que las redes de monitoreo existen principalmente en las grandes ciudades. Van et al. (2021) alerta que, las mediciones in situ no brindan información adecuada sobre la distribución espacial de las partículas debido a la concentración altamente variable en el espacio y el tiempo, indicando que no siempre se prefieren a menos que se requieran debido a sus altos costos operativos. La cobertura temporal de las mediciones de PM in situ también varía según la funcionalidad del instrumento y el período de operación.

El modelo gaussiano simplificado permite identificar las áreas con las concentraciones más altas de PM₁₀, calculando los valores de concentración máxima esperados a nivel del suelo cerca de las fuentes emisoras. Estos niveles de exposición directa representan un riesgo

potencial para la salud pública de las comunidades cercanas, dado que pueden superar los límites recomendados por organizaciones internacionales de salud, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), que establece valores de referencia para reducir los efectos negativos del PM10 en la salud humana.

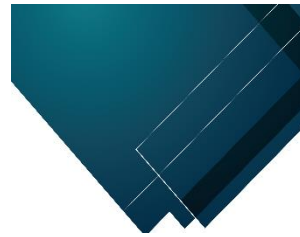
Por la versatilidad de este modelo fue usado para la investigación que inspiró a los autores del texto para tratar de dar respuesta a la necesidad de información sobre la dispersión de los contaminantes en particular las PM10 en este importante eje industrial de la carretera Panamericana Sur de Pisco Perú.

Capítulo 3

Uso del modelo Gaussiano Simplificado para estimar la dispersión de partículas PM10 en áreas industriales

A large, stylized graphic of the number '3' is positioned on the right side of the page. The number is dark blue and is contained within a white diamond shape. This diamond is set against a background of overlapping, semi-transparent geometric shapes in shades of grey and white, creating a modern, layered effect. The overall design is clean and professional, with a strong emphasis on the chapter number.

3



Capítulo 3

Uso del modelo Gaussiano Simplificado para estimar la dispersión de partículas PM10 en áreas industriales

La investigación que dio origen a este texto, se fundamenta en la necesidad impostergable de abordar la problemática de la contaminación atmosférica en una región estratégica como Pisco con un notable crecimiento industrial, el cual trae consigo la posibilidad de impactar la calidad del aire del área. El estudio propone un modelo predictivo preciso que permite evaluar y anticipar la concentración de partículas PM10, parámetro que de acuerdo a la interpretación de Rovira et al. (2015) es un indicador crucial de la calidad del aire y especialmente importante en las inmediaciones de las chimeneas industriales a lo largo de la carretera Panamericana Sur.

El aporte del texto se destaca por diversas razones, en primer lugar, la actividad industrial en la región que sirve de marco a la investigación, ha experimentado un crecimiento significativo, lo que

plantea inquietudes sobre el impacto en la pureza atmosférica y, consecuentemente, en la salud pública de la comunidad de Pisco. Por otra parte, la falta de herramientas predictivas específicas para esta zona crea una brecha de conocimiento que esta investigación busca llenar mediante la formulación de un modelo gaussiano simplificado basado en las experiencias de Ma et al. (2017).

En segundo lugar, la ubicación estratégica de Pisco en la carretera Panamericana Sur, una vía de gran importancia económica, desarrollo industrial y comercial, acentúa la necesidad de comprender y prever la dispersión de contaminantes provenientes de chimeneas industriales. Este modelo no solo beneficiará a la población local, sino que también contribuirá a la sostenibilidad regional y al cumplimiento de regulaciones ambientales.

Los autores de texto comparten la relevancia global de abordar la contaminación del aire, ya que contribuye a la mitigación de los impactos del cambio climático y se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible.

Por lo tanto, la investigación surge de la necesidad de generar conocimientos específicos para la región de Pisco, proporcionando una herramienta práctica y precisa que permita anticipar y gestionar la concentración de PM10, promoviendo así la salud pública y la sostenibilidad ambiental en la zona.

La relevancia de esta investigación radica en la creciente preocupación por la calidad atmosférica y sus efectos directos en la salud humana y el medio ambiente. Como se mencionó, Pisco, Ica, al ser una región en desarrollo con un aumento en la actividad industrial, enfrenta desafíos particulares en términos de contaminación atmosférica.

Además, la investigación es relevante en el contexto global de la lucha contra la contaminación atmosférica y la promoción de la salud ambiental. La contribución de este estudio puede tener aplicaciones en otras áreas geográficas con condiciones similares, agregando conocimientos valiosos a la comprensión de la dispersión de partículas PM10.

Por lo tanto, la importancia de esta investigación radica en su capacidad para abordar problemas específicos de contaminación del aire en la región de Pisco, proporcionando un modelo predictivo que no solo tiene aplicaciones locales, sino que también contribuye al conocimiento científico general sobre la gestión de la calidad del aire en contextos similares.

En este capítulo exploraremos la aplicación de un modelo gaussiano simplificado específico para esta área en la búsqueda de una evaluación más precisa y anticipada de la concentración de PM10, que proporcione información vital para la toma de decisiones en la gestión de la calidad del aire en la precitada Región.

3.1 Recorrido metodológico

Este apartado incluyo la definición del área de interés de la investigación, la selección de los puntos de monitoreo para la instalación del sistema de recolección y medición de material particulado, así como los supuestos indagatorios y las variables que sirvieron de guía para el desarrollo del estudio base del texto Modelo Gaussiano Simplificado y su aplicación para estimar la dispersión **de PM10** en áreas industriales. A continuación, los detalles de este apartado.

3.1.1 Descripción de la zona de interés para la aplicación del modelo propuesto

El lugar seleccionado se encuentra a lo largo de la carretera Panamericana Sur, aproximadamente entre los kilómetros 231 y 240, al sur de la ciudad de Pisco, en el departamento de Ica. Esta ubicación en la costa peruana presenta condiciones geográficas que facilitan la acumulación de contaminantes en el aire debido a la proximidad de las industrias y al tránsito continuo en la carretera.

Para la ubicación del área de estudio en la Panamericana Sur, se tomó como referencia la localización de las empresas Praxair y Aceros Arequipa, las coordenadas UTM son aproximadamente las siguientes:

Punto 1 (Km 231):

Zona UTM: 18L

Punto 2 (Km 240):

Zona UTM: 18L

Este (X): 421000 m

Este (X): 428000 m

Norte (Y): 8480000 m

Norte (Y): 8475000 m

Estas coordenadas UTM corresponden a la zona 18L, que cubre gran parte de la región de Ica en el sur de Perú. La ubicación de estos puntos facilita el establecimiento de un área de estudio representativa para medir la dispersión de PM10 proveniente de las actividades industriales, con el fin de aplicar el modelo gaussiano simplificado y monitorear la concentración de partículas en esta zona de impacto ambiental significativo.

Para llevar a cabo el monitoreo de PM10, se realizó la instalación de un HI-VOL (sistema de recolección y medición de material particulado) en puntos estratégicos alrededor de estas plantas industriales, de acuerdo con la dirección y velocidad del viento y la disposición de las principales fuentes de emisión. Estos puntos de muestreo permitieron medir y evaluar las concentraciones de PM10 en tiempo real, lo cual fue crucial para calibrar y validar el modelo gaussiano simplificado utilizado en el estudio.

Este estudio, proporciona una visión clara y precisa del impacto de las emisiones industriales en la calidad del aire local, con miras a establecer medidas de mitigación adecuadas para proteger la salud pública y reducir los niveles de contaminación en esta importante zona industrial de la región de Ica.

El Clima, como elemento fundamental para el estudio fue considerado en los análisis previos a la selección del sitio; al respecto esta región de Ica presenta condiciones climáticas predominantemente áridas, caracterizadas por temperaturas cálidas durante el día y frescas en la noche. La temperatura promedio anual es de alrededor de 22 °C, y las precipitaciones son escasas, con lluvias anuales que rara vez superan los 20 mm. La baja humedad y la presencia de vientos moderados, con una dirección predominante hacia el sureste, favorecen la dispersión de partículas en el aire, pero también contribuyen a episodios de alta concentración de PM10 cuando las condiciones atmosféricas son estables.

Figura 4

Ubicación del área de influencia del estudio, Panamericana Sur, Pisco-Ica.



Marco de referencia de la investigación

El desarrollo de un modelo predictivo específico para esta región representa una contribución concreta a la comprensión y gestión de la contaminación atmosférica a nivel local y regional. En el marco de esta premisa, surge la necesidad de predecir ¿De qué manera la aplicación de un modelo gaussiano simplificado contribuye a estimar la dispersión de PM10 en las áreas industriales de la Panamericana Sur, Pisco, Ica? La búsqueda de respuesta a esta interrogante motorizó la investigación de este texto, que tuvo la finalidad de aplicar un modelo gaussiano simplificado que contribuya en su efectividad en estimar la dispersión de PM10 en las áreas industriales de la Panamericana Sur, Pisco, Ica.

3.1.2 Supuestos indagatorios y variables de la investigación

Para el desarrollo de la investigación se partió de la conjetura o Hipótesis principal de que: La aplicación de un modelo gaussiano simplificado contribuye a estimar la dispersión de PM10 en las áreas industriales de la Panamericana Sur, Pisco, Ica.

3.1.3 Definición de las variables

Con base de a la anterior hipótesis se definieron las variables independiente, dependiente e interviniente:

Variable independiente: “*Modelo gaussiano simplificado*: el modelo gaussiano simplificado es una herramienta matemática que se utiliza para prever la dispersión de contaminantes en la atmósfera, centrándose en la difusión de emisiones provenientes de fuentes puntuales, como chimeneas industriales. Como lo indica Perdiz, este modelo se basa en la aplicación de la distribución gaussiana, también conocida como campana de Gauss o distribución normal, que describe la forma en que se dispersan los contaminantes en la atmósfera.

La conceptualización básica del modelo gaussiano simplificado implica suponer que la dispersión de contaminantes sigue un patrón simétrico alrededor de la fuente de emisión, con una concentración máxima en el punto de liberación y disminuyendo gradualmente a medida que nos alejamos. Este enfoque simplificado es particularmente útil para evaluar la contaminación atmosférica en condiciones atmosféricas estables, donde la verticalidad y la horizontalidad de la dispersión pueden modelarse de manera más eficaz.

En el contexto de la investigación realizada el modelo gaussiano simplificado se aplica específicamente para prever la densidad de partículas PM10 a “nivel del suelo” en las cercanías de chimeneas industriales a lo largo de la carretera Panamericana Sur en Pisco, Ica, Perú. Este modelo proporciona una aproximación efectiva que facilitará la comprensión y gestión de la calidad del aire en la región, contribuyendo así a la toma de decisiones informada y a la implementación de estrategias de mitigación.

Variable dependiente: “Concentración de PM10 a nivel del suelo”: Se refiere a la cantidad de partículas suspendidas en el aire con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros. Estas partículas, conocidas como material particulado de tamaño grueso (PM10), pueden incluir polvo, hollín, cenizas y otros componentes que pueden tener origen natural (como la erosión del suelo) o ser resultado de actividades antropogénicas, como la quema de combustibles fósiles, la industria y otras fuentes de emisión.

La medición de la “concentración de PM10 a nivel del suelo” es crucial para evaluar la calidad del aire, ya que estas partículas pueden tener impactos significativos en la salud humana y ambiental. Las partículas de tamaño PM10 pueden penetrar profundamente en los pulmones cuando se inhalan, afectando la función respiratoria y contribuyendo a problemas de salud como enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

La conceptualización de esta variable secundaria implica considerar la cantidad de PM10 presentes en la atmósfera a nivel del suelo en una ubicación y momento específicos. La evaluación de esta concentración es esencial para comprender el riesgo potencial para la salud y tomar medidas adecuadas para mitigar la exposición a estas partículas contaminantes.

Variable interviniente La Chimenea: la chimenea actúa como la fuente puntual de emisión de contaminantes, siendo un factor clave

que influye en la dispersión y concentración de partículas en la atmósfera circundante Zhou et al. (2017).

La altura, el diámetro, la tasa de emisión y otros atributos de la chimenea pueden ser considerados como variables intervinientes en el modelo. Estos parámetros impactan directamente en la forma en que los contaminantes son liberados y dispersados en el aire. La variabilidad en estas características de la chimenea puede influir en la magnitud y la extensión de la concentración de PM10 a nivel del suelo.

Por lo tanto, al desarrollar el modelo gaussiano simplificado, se considerarán estas variables intervinientes asociadas con las chimeneas industriales, permitiendo así una estimación más precisa de la dispersión de contaminantes y la concentración resultante en la zona de estudio.

Tabla 5

Variables de estudio.

| Variable independiente | Indicadores | Unidades | Estrategia metodológica |
|--|---|--------------------------|---|
| VI: Modelo gaussiano simplificado | I_{1,1,1}: Tasa | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | <i>Tipo:</i> Cuantitativa, Aplicada <i>Nivel:</i> Descriptiva <i>Diseño:</i> No experimental <i>Población:</i> fuentes industriales de emisión de partículas en suspensión (PM10) <i>Muestra:</i> Puntos de monitoreo seleccionados a lo largo de un área específica panamericana sur <i>Técnicas de recolección de datos:</i> Observación, cadena de custodia <i>Instrumentos de recolección de datos:</i> Hybol, GPS. <i>Técnicas de procesamiento de datos:</i> Estadística descriptiva <i>Interpretación de los datos:</i> Comparación con Estándares |
| | I_{1,1,2}: Velocidad del viento | m/s | |
| | I_{1,1,3}: Altura de la chimenea | m | |
| | I_{1,1,4}: Desviaciones estándar σ_y y σ_z | | |
| Variable dependiente | Indicadores | | |
| VD: “Concentración de PM10 a nivel del suelo” | I_{D,1,1}: “Concentración de partículas PM10” | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | |

3.1.4 Tipo, nivel y diseño de investigación

Para la materialización de la investigación se planteó un estudio de *Tipo aplicado* porque se buscó generar un modelo práctico que permita estimar la dispersión de partículas PM10 en áreas industriales específicas de la Panamericana Sur en Pisco, Ica. Como lo indica Supo (2015), estos estudios se orientan a resolver un problema concreto de impacto ambiental, aprovechando el conocimiento científico y técnico para mejorar el control de emisiones en la región, y contribuir así a la salud pública y a la sostenibilidad ambiental de la zona.

Con relación al *nivel de esta investigación es explicativo*, considerando al mismo autor, porque pretende comprender las causas de la distribución espacial de los contaminantes en función de las características industriales del área, utilizando un modelo matemático para explicar cómo estas condiciones influyen en las concentraciones de PM10 a nivel del suelo.

Por otra parte, el *diseño de la investigación es no experimental y longitudinal*. De acuerdo a Hernández y Mendoza (2018), al ser no experimental, el estudio no manipula las variables, sino que mide y observa las condiciones existentes en el área de estudio. Es longitudinal porque la recolección de datos y la aplicación del modelo se realizaron en tres momentos distintos, lo que permitió evaluar el estado actual de la dispersión de PM10 sin intervenir en los factores causales.

3.2 Población y muestra

La población de este estudio incluye el corredor industrial a lo largo de la carretera Panamericana Sur, específicamente entre los kilómetros 231 y 240, al sur de la ciudad de Pisco, en el departamento de Ica. Esta zona se caracteriza por la presencia de industrias, como Praxair, Aceros Arequipa y Minsur, y un flujo vehicular constante que contribuye a la emisión de partículas en suspensión, particularmente PM10. Debido a las condiciones geográficas de la costa peruana, esta área es propensa a la acumulación de contaminantes en el aire, lo que puede afectar la calidad del aire y la salud de las comunidades vecinas. El estudio abarca las áreas adyacentes a las industrias en este tramo de la Panamericana Sur, que representan una parte crítica del corredor industrial en Pisco y constituyen la población de interés para la evaluación de la dispersión de PM10.

Previo a la instalación de los puntos de monitoreo de la calidad del aire, se realizaron visitas preliminares al área de estudio para verificar su adecuación y definir las ubicaciones más apropiadas, así se seleccionaron muestras para este estudio que incluyen puntos de monitoreo ubicados estratégicamente dentro del tramo entre los kilómetros 231 y 240 de la Panamericana Sur, definidos en función de su cercanía a las principales fuentes emisoras de PM10, como son las industrias Praxair y Aceros Arequipa. La ubicación de estos puntos permitió la aplicación eficaz del modelo gaussiano simplificado para estimar la concentración de PM10 en áreas representativas del corredor

industrial, optimizando los recursos y obteniendo datos relevantes sobre la dispersión del contaminante en esta región.

3.3 Procedimientos técnicos

Por lo significativo de la investigación así como por las implicaciones de los resultados, fue necesario documentar cada fase de la misma, lo que implicó *delimitar el área de investigación* definiendo las especificaciones del proceso a seguir, haciendo un reconocimiento previo del lugar o el área de estudio, identificando los puntos para tomar los datos comprendido entre los kilómetros 231 y 240 y como aspecto muy importante, se definió la Cadena de custodia, en el monitoreo del PM10 lo cual es esencial para garantizar la fiabilidad y la validez de los datos obtenidos.

Monitoreo en puntos en la zona industrial: la toma de muestras se realizó en los puntos seleccionados o localizados en coordenadas UTM ya citadas: el primer punto (Km 231) se encuentra en Zona UTM 18L, con coordenadas Este (X): 421000 m y Norte (Y): 8480000 m; y el segundo punto (Km 240) en Zona UTM 18L, con coordenadas Este (X): 428000 m y Norte (Y): 8475000 m.

Análisis del material particulado PM10: se efectuó con un laboratorio reputado, a fin de tener resultados fidedignos.

Instrumento de recolección de datos

Se utilizó el equipo Hybol para realizar mediciones de la concentración de material particulado con un tamaño inferior a 10 micras (PM-10) en los puntos de monitoreo designados como primer punto (Km 231) y el segundo punto (Km 240).

La toma de muestras en campo se realizó siguiendo los criterios establecidos en el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad de Aire ” [D.S.N 074-2001-PCM]. La climatología en la ciudad de Ica fue obtenida de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Técnicas de procesamiento de datos

En esta investigación, se aplicó la ecuación de un modelo gaussiano simplificado para estimar la dispersión de PM10, integrando variables como la velocidad y dirección del viento, y las características de las fuentes emisoras. Para ello, se utilizó Microsoft Excel como herramienta para el análisis de los resultados, generando gráficos que facilitaron la interpretación. Finalmente, se validó la precisión del modelo comparando las concentraciones estimadas con los datos reales de monitoreo, utilizando la técnica estadística de la t-Student.

Análisis e interpretación de datos

El análisis e interpretación de los datos en esta investigación se centró en la evaluación de la dispersión de PM10 a través del modelo gaussiano simplificado, considerando variables clave como la velocidad y dirección del viento, así como las características de las fuentes emisoras. Los resultados obtenidos se analizaron mediante gráficos generados en Microsoft Excel, lo que facilitó la visualización de las concentraciones estimadas de PM10 en diferentes puntos del área de estudio. Además, se realizó una validación del modelo comparando los valores estimados con los datos reales de monitoreo utilizando la prueba estadística t-Student, lo que permitió evaluar la precisión y fiabilidad del modelo para representar la dispersión de PM10 en el contexto industrial de la Panamericana Sur, Pisco, Ica.

3.4 Resultados

La investigación se centró en la región de la Panamericana Sur en Pisco, Ica, donde la creciente actividad industrial, junto con el tránsito vehicular constante, genera emisiones de PM10 que afectan la calidad del aire. La implementación del modelo gaussiano simplificado permitió simular cómo estas emisiones se dispersan en el entorno, proporcionando estimaciones de las concentraciones de PM10 en diversas zonas dentro de la región. Al hacerlo, el modelo contribuyó al monitoreo y evaluación de los niveles de contaminación, lo cual es esencial para la protección de la salud pública y la toma de decisiones

en la gestión de la calidad del aire. Esto es muy importante dado que Pisco es una zona de alto impacto industrial, que requiere contar con herramientas precisas para la estimación de la dispersión de contaminantes aspecto fundamental para diseñar políticas públicas efectivas. Los resultados de la investigación se plasman a continuación:

Puntos de monitoreo y estaciones de muestreo

La información de los puntos de monitoreo de la calidad del aire está disponible en la Figura 4 y en la Tabla 6, que indican el parámetro específico que se muestreó.

Tabla 6

Descripción y ubicación en coordenadas UTM de los puntos de monitoreo de calidad de aire.

| Estaciones de Monitoreo | Coordenadas UTM (WGS zona 18L) | | Descripción |
|-------------------------|--------------------------------|---------|---|
| | “Este” | “Norte” | |
| PUNTO-01 | 0421000 | 8480000 | Punto 1: Km 231 Panamericana Sur, ubicado en la azotea del Restaurante Karen, cerca de la Empresa MINSUR. |
| PUNTO-02 | 0428000 | 8475000 | Punto 2: Km 240 Panamericana Sur, ubicado a un costado del taller mecánico, cerca del grifo Primax. |

Nota. “Coordenadas UTM en el WGS-84, zona 18L”

Los resultados de las evaluaciones de calidad del aire realizadas en los puntos de monitoreo PUNTO-01 y PUNTO-02 para el PM10 indican que los niveles medidos se encuentran por debajo del límite de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, conforme a lo estipulado en el D.S. N°003-2017-MINAM.

Tabla 7

Resultado de las estaciones de muestreo de la calidad del aire, meses de julio, agosto y setiembre.

| Parámetros | Unidad | Fecha | Periodo | Resultados | | ECA vigentes desde 2017 hasta la actualidad (“D.S. N°003-2017-MINAM”) |
|---|--------------------------|----------|---------|------------|----------|---|
| | | | | PUNTO-01 | PUNTO-02 | |
| “Partículas de menos de 10 micras (PM10)” | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Jul.2024 | 24 h | 60,12 | 20,11 | 100 |
| | | Ago.2024 | | 59,15 | 18,43 | |
| | | Set.2024 | | 59,76 | 19,65 | |

Valores aproximados de σ_y y σ_z , en función de la distancia en la dirección del viento y la clase de estabilidad D, empleando la Tabla 7.

Como se indicó en el capítulo anterior la Tabla 7 presenta los valores aproximados de las desviaciones estándar de la dirección vertical de (σ_y) y (σ_z) en función de la distancia a favor del viento y las diferentes clases de estabilidad atmosférica. Estos valores son fundamentales en los modelos de dispersión gaussiana, ya que permiten ajustar la dispersión de contaminantes en función de la estabilidad del

aire, para el estudio, se corresponde con una estabilidad atmosférica clasificada como Clase D.

| Datos (Jul-2024) | | | |
|-------------------------|--------|-----|--------------------------|
| Q = | 14.35 | g/s | 14350000 $\mu\text{g/s}$ |
| v = | 4.9 | m/s | |
| H = | 70 | m | |
| $\pi =$ | 3.1416 | | |

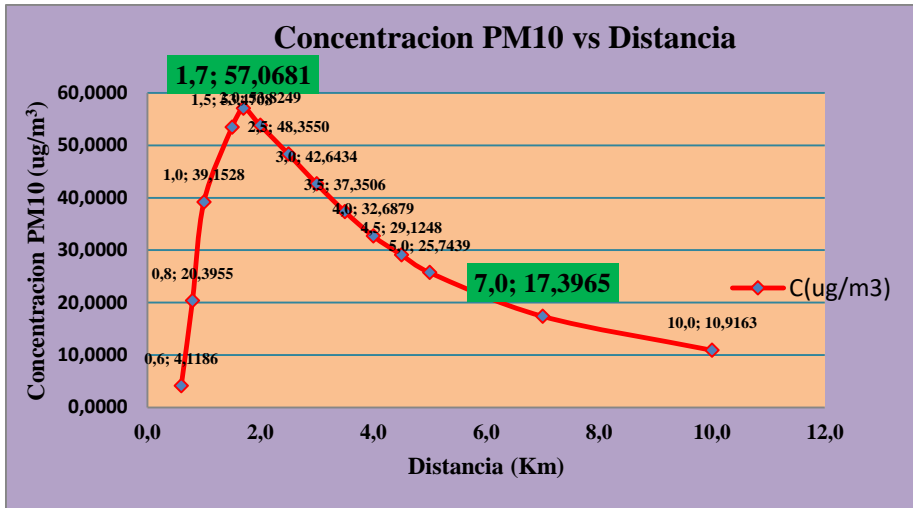
Tabla 8

Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones (Tabla 3). Punto 1 y Punto 2: julio-2024.

| | X(km) | σ_y | σ_z | $A = \frac{Q}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v)}$ | $m = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2$ | B= exp(m) | $C\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = A * B$ |
|------------|-------------|------------|------------|---|---|-----------|--|
| | 0.6 | 41.6667 | 21.0000 | 1065.3612 | -5.56 | 0.0039 | 4.1186 |
| | 0.8 | 54.6667 | 26.6667 | 639.4603 | -3.45 | 0.0319 | 20.3955 |
| | 1.0 | 68.0000 | 32.0000 | 428.3966 | -2.39 | 0.0914 | 39.1528 |
| | 1.5 | 99.0000 | 41.0000 | 229.6603 | -1.46 | 0.2328 | 53.4708 |
| P-1 | 1.7 | 111.4000 | 45.9500 | 182.1102 | -1.16 | 0.3134 | 57.0681 |
| | 2.0 | 130.0000 | 50.0000 | 143.4140 | -0.98 | 0.3753 | 53.8249 |
| | 2.5 | 158.7500 | 56.7500 | 103.4726 | -0.76 | 0.4673 | 48.3550 |
| | 3.0 | 187.5000 | 63.5000 | 78.2943 | -0.61 | 0.5447 | 42.6434 |
| | 3.5 | 216.2500 | 70.2500 | 61.3624 | -0.50 | 0.6087 | 37.3506 |
| | 4.0 | 245.0000 | 77.0000 | 49.4138 | -0.41 | 0.6615 | 32.6879 |
| | 4.5 | 270.8333 | 82.3333 | 41.8049 | -0.36 | 0.6967 | 29.1248 |
| | 5.0 | 296.6667 | 90.5000 | 34.7206 | -0.30 | 0.7415 | 25.7439 |
| P-2 | 7.0 | 400.0000 | 109.0000 | 21.3805 | -0.21 | 0.8137 | 17.3965 |
| | 10.0 | 550 | 136 | 12.4624 | -0.13 | 0.8759 | 10.9163 |

Figura 5

Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 8, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur.



| Datos (Ago-2024) | | | |
|------------------|--------|-----|---------------|
| Q = | 15.01 | g/s | 14350000 μg/s |
| v = | 5.4 | m/s | |
| H = | 70 | m | |
| π = | 3.1416 | | |

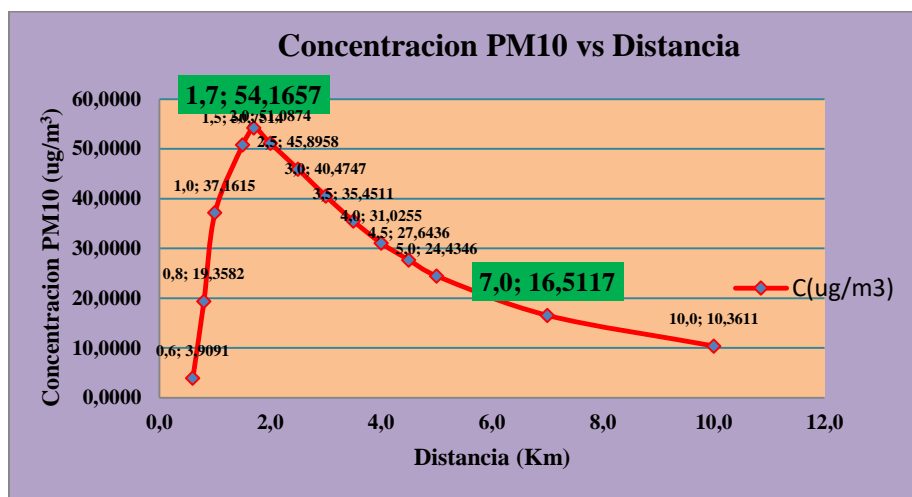
Tabla 9

Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones (Tabla 3). Punto 1 y Punto 2: agosto-2024.

| $X(km)$ | σ_y | σ_z | $A = \frac{Q}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v)}$ | $m = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2$ | $B = \exp(m)$ | $C\left(\frac{\mu g}{m^3}\right) = A * B$ |
|----------------|-----------------|-----------------|---|---|---------------|---|
| 0.6 | 41.6667 | 21.0000 | 1011.1789 | -5.56 | 0.0039 | 3.9091 |
| 0.8 | 54.6667 | 26.6667 | 606.9385 | -3.45 | 0.0319 | 19.3582 |
| 1.0 | 68.0000 | 32.0000 | 406.6092 | -2.39 | 0.0914 | 37.1615 |
| 1.5 | 99.0000 | 41.0000 | 217.9802 | -1.46 | 0.2328 | 50.7514 |
| P-2 1.7 | 111.4000 | 45.9500 | 172.8484 | -1.16 | 0.3134 | 54.1657 |
| 2.0 | 130.0000 | 50.0000 | 136.1202 | -0.98 | 0.3753 | 51.0874 |
| 2.5 | 158.7500 | 56.7500 | 98.2102 | -0.76 | 0.4673 | 45.8958 |
| 3.0 | 187.5000 | 63.5000 | 74.3124 | -0.61 | 0.5447 | 40.4747 |
| 3.5 | 216.2500 | 70.2500 | 58.2416 | -0.50 | 0.6087 | 35.4511 |
| 4.0 | 245.0000 | 77.0000 | 46.9007 | -0.41 | 0.6615 | 31.0255 |
| 4.5 | 270.8333 | 82.3333 | 39.6788 | -0.36 | 0.6967 | 27.6436 |
| 5.0 | 296.6667 | 90.5000 | 32.9548 | -0.30 | 0.7415 | 24.4346 |
| P-1 7.0 | 400.0000 | 109.0000 | 20.2932 | -0.21 | 0.8137 | 16.5117 |
| 10.0 | 550 | 136 | 11.8286 | -0.13 | 0.8759 | 10.3611 |

Figura 6

Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 9, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur.



Datos (Set-2024)

| | | | |
|---------|--------|-----|---------------------------------|
| Q = | 14.52 | g/s | 14350000 $\mu\text{g}/\text{s}$ |
| v = | 5.0 | m/s | |
| H = | 70 | m | |
| π = | 3.1416 | | |

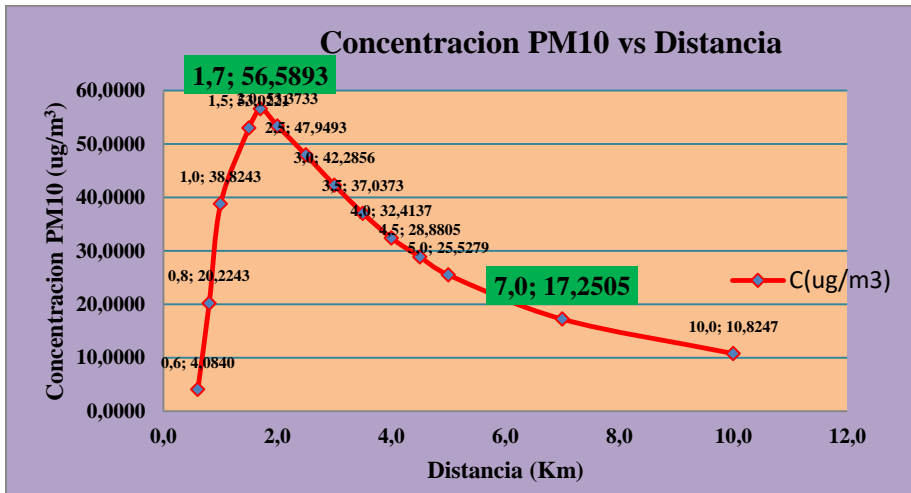
Tabla 10

Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones (Tabla 3). Punto 1 y Punto 2: septiembre-2024.

| X(km) | σ_y | σ_z | $A = \frac{Q}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v)}$ | $m = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2$ | $B = \exp(m)$ | $C\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = A * B$ |
|---------|-----------------|-----------------|---|---|---------------|--|
| 0.6 | 41.6667 | 21.0000 | 1056.4226 | -5.56 | 0.0039 | 4.0840 |
| 0.8 | 54.6667 | 26.6667 | 634.0951 | -3.45 | 0.0319 | 20.2243 |
| 1.0 | 68.0000 | 32.0000 | 424.8023 | -2.39 | 0.0914 | 38.8243 |
| 1.5 | 99.0000 | 41.0000 | 227.7334 | -1.46 | 0.2328 | 53.0221 |
| P-1 1.7 | 111.4000 | 45.9500 | 180.5822 | -1.16 | 0.3134 | 56.5893 |
| 2.0 | 130.0000 | 50.0000 | 142.2107 | -0.98 | 0.3753 | 53.3733 |
| 2.5 | 158.7500 | 56.7500 | 102.6044 | -0.76 | 0.4673 | 47.9493 |
| 3.0 | 187.5000 | 63.5000 | 77.6374 | -0.61 | 0.5447 | 42.2856 |
| 3.5 | 216.2500 | 70.2500 | 60.8476 | -0.50 | 0.6087 | 37.0373 |
| 4.0 | 245.0000 | 77.0000 | 48.9992 | -0.41 | 0.6615 | 32.4137 |
| 4.5 | 270.8333 | 82.3333 | 41.4541 | -0.36 | 0.6967 | 28.8805 |
| 5.0 | 296.6667 | 90.5000 | 34.4293 | -0.30 | 0.7415 | 25.5279 |
| P-2 7.0 | 400.0000 | 109.0000 | 21.2011 | -0.21 | 0.8137 | 17.2505 |
| 10.0 | 550 | 136 | 12.3579 | -0.13 | 0.8759 | 10.8247 |

Figura 7

Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 10, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur.



Disertaciones interpretativas:

Las Tablas 8, 9 y 10 presentan resultados del modelo gaussiano simplificado para estimar las concentraciones de contaminantes provenientes de fuentes fijas industriales en función de la distancia horizontal (X) desde el punto de emisión. Estas estimaciones se basan en parámetros de estabilidad atmosférica tipo D (moderadamente estable) y emplean los valores de dispersión (σ_y) y σ_z) de la Tabla 3 según Turner.

▪ **Comparación con Tabla 7:**

- ✓ En la Tabla 7, los resultados de monitoreo directo muestran valores medidos de PM10 para los puntos 1 y 2, en los meses de julio, agosto y septiembre, indicando concentraciones que no superan los ECA vigentes ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un promedio de 24 horas).
- ✓ Las Tablas 8, 9 y 10 complementan estos datos mediante simulaciones del modelo gaussiano para evaluar las concentraciones estimadas a diferentes distancias. Los valores calculados C ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) decrecen con la distancia debido a la dispersión del contaminante en el aire.

▪ **Tendencias en las Tablas 8, 9 y 10:**

- ✓ Los valores estimados (C) muestran un descenso exponencial con el incremento de la distancia (X), siguiendo la lógica de dispersión atmosférica.
- ✓ El parámetro A (dependiente de la tasa de emisión Q , la velocidad del viento v , y las dispersiones σ_y y σ_z) es mayor en julio debido a valores relativamente bajos de velocidad del viento, lo que limita la dispersión y resulta en mayores concentraciones cerca de la fuente.
- ✓ En agosto, una mayor velocidad del viento reduce las concentraciones iniciales (A), favoreciendo una dispersión más

eficiente. En septiembre, los valores de concentración son similares a julio debido a un comportamiento de Q y v más similar.

▪ **Relación con las Figuras 5, 6 y 7:**

- ✓ Estas Figuras muestran gráficamente las concentraciones estimadas (C) en función de la distancia, permitiendo visualizar claramente la disminución del impacto conforme aumenta la dispersión en el ambiente.
- ✓ Refuerzan la validez del modelo gaussiano simplificado para caracterizar las emisiones, evidenciando que las concentraciones se reducen a niveles bajos a partir de distancias mayores a 2 km.

Por lo tanto, los datos simulados y medidos son consistentes: los niveles de PM10 en los puntos de monitoreo (Tabla 7) están dentro de los límites normativos y las simulaciones confirman que las concentraciones disminuyen rápidamente con la distancia debido a la dispersión, destacándose la importancia de las condiciones atmosféricas (como velocidad del viento y estabilidad) en la dispersión y su impacto en los niveles de calidad del aire.

Valores aproximados de σ_y y σ_z , en función de la distancia en la dirección del viento y la clase de estabilidad D, empleando la Tabla 4

Para calcular las desviaciones estándar de dispersión horizontal (σ_y) y vertical (σ_z) en la dirección del viento, se aplicaron las ecuaciones (4) y (5), que dependen de la distancia (X) y las condiciones de estabilidad atmosférica. Los valores de las constantes a, c, d, y f fueron seleccionados de la Tabla 4, correspondientes a la estabilidad tipo D, con la constante b establecida en 0.894. Estos parámetros ajustan el modelo para representar cómo la dispersión de PM10 varía con la distancia desde la fuente y las condiciones meteorológicas, facilitando una estimación precisa de la dispersión de contaminantes; los resultados se muestran en la Tabla 10.

$$\sigma_y = aX^b \quad (\text{Ecu. 4})$$

$$\sigma_z = cX^d + f \quad (\text{Ecu. 5})$$

| Datos (Jul-2024) | | | |
|------------------|--------|-----|--------------------------|
| Q = | 14.35 | g/s | 14350000 $\mu\text{g/s}$ |
| v = | 4.9 | m/s | |
| H = | 70 | m | |
| $\pi =$ | 3.1416 | | |

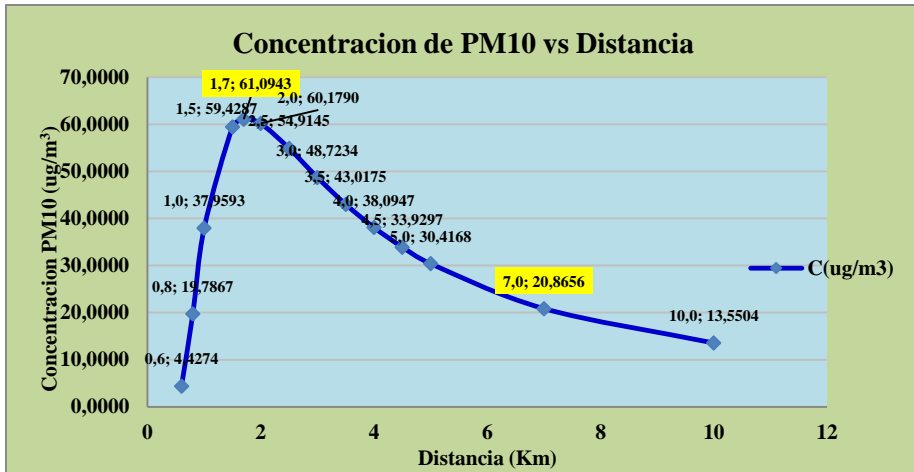
Tabla 11

Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones de la (Tabla 4). julio-2024.

| | X(km) | σ_y | σ_z | $A = \frac{Q}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v)}$ | $m = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2$ | $B = \exp(m)$ | $C\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = A * B$ |
|-----|------------|-----------------|-----------------|---|---|---------------|--|
| | 0.6 | 43.1044 | 21.2244 | 1018.9378 | -5.44 | 0.0043 | 4.4274 |
| | 0.8 | 54.7925 | 26.5409 | 641.0155 | -3.48 | 0.0309 | 19.7867 |
| | 1.0 | 66.0000 | 31.5000 | 448.3843 | -2.47 | 0.0847 | 37.9593 |
| | 1.5 | 92.5559 | 41.8559 | 240.6271 | -1.40 | 0.2470 | 59.4287 |
| P-1 | 1.7 | 102.7397 | 45.5156 | 199.3455 | -1.18 | 0.3065 | 61.0943 |
| | 2.0 | 117.6530 | 50.6343 | 156.4793 | -0.96 | 0.3846 | 60.1790 |
| | 2.5 | 141.7183 | 58.3998 | 112.6335 | -0.72 | 0.4876 | 54.9145 |
| | 3.0 | 164.9921 | 65.4431 | 86.3333 | -0.57 | 0.5644 | 48.7234 |
| | 3.5 | 187.6276 | 71.9374 | 69.0643 | -0.47 | 0.6229 | 43.0175 |
| | 4.0 | 209.7307 | 77.9961 | 56.9862 | -0.40 | 0.6685 | 38.0947 |
| | 4.5 | 231.3786 | 83.6980 | 48.1356 | -0.35 | 0.7049 | 33.9297 |
| | 5.0 | 252.6300 | 89.1007 | 41.4132 | -0.31 | 0.7345 | 30.4168 |
| P-2 | 7.0 | 334.4689 | 108.4593 | 25.6970 | -0.21 | 0.8120 | 20.8656 |
| | 10.0 | 450.3435 | 133.0024 | 15.5633 | -0.14 | 0.8707 | 13.5504 |

Figura 8

Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 11, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur.



| Datos (Ago-2024) | | | | |
|------------------|--------|-----|----------|------------------------|
| Q = | 15.01 | g/s | 14350000 | $\mu\text{g}/\text{s}$ |
| v = | 5.4 | m/s | | |
| H = | 70 | m | | |
| $\pi =$ | 3.1416 | | | |

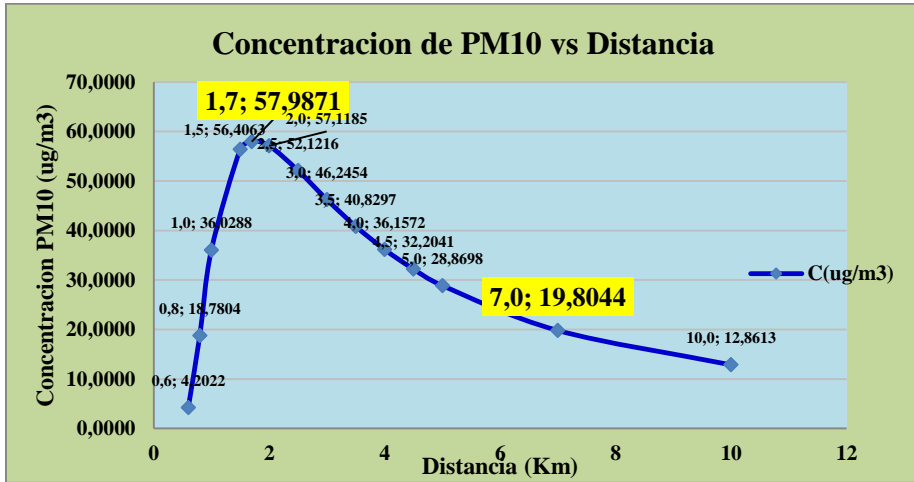
Tabla 12

Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones de la (Tabla 4), agosto-2024.

| | X(km) | σ_y | σ_z | $A = \frac{Q}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v)}$ | $m = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2$ | B= exp(m) | $C\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = A * B$ |
|------------|-------------|-----------------|-----------------|---|---|---------------|--|
| | 0.6 | 43.1044 | 21.2244 | 967.1165 | -5.44 | 0.0043 | 4.2022 |
| | 0.8 | 54.7925 | 26.5409 | 608.4146 | -3.48 | 0.0309 | 18.7804 |
| | 1.0 | 66.0000 | 31.5000 | 425.5803 | -2.47 | 0.0847 | 36.0288 |
| | 1.5 | 92.5559 | 41.8559 | 228.3892 | -1.40 | 0.2470 | 56.4063 |
| P-1 | 1.7 | 102.7397 | 45.5156 | 189.2071 | -1.18 | 0.3065 | 57.9871 |
| | 2.0 | 117.6530 | 50.6343 | 148.5210 | -0.96 | 0.3846 | 57.1185 |
| | 2.5 | 141.7183 | 58.3998 | 106.9052 | -0.72 | 0.4876 | 52.1216 |
| | 3.0 | 164.9921 | 65.4431 | 81.9425 | -0.57 | 0.5644 | 46.2454 |
| | 3.5 | 187.6276 | 71.9374 | 65.5518 | -0.47 | 0.6229 | 40.8297 |
| | 4.0 | 209.7307 | 77.9961 | 54.0880 | -0.40 | 0.6685 | 36.1572 |
| | 4.5 | 231.3786 | 83.6980 | 45.6875 | -0.35 | 0.7049 | 32.2041 |
| | 5.0 | 252.6300 | 89.1007 | 39.3070 | -0.31 | 0.7345 | 28.8698 |
| P-2 | 7.0 | 334.4689 | 108.4593 | 24.3901 | -0.21 | 0.8120 | 19.8044 |
| | 10.0 | 450.3435 | 133.0024 | 14.7718 | -0.14 | 0.8707 | 12.8613 |

Figura 9

Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 12, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur.



| Datos (Set-2024) | | | |
|------------------|--------|-----|---------------|
| Q = | 14.52 | g/s | 14350000 μg/s |
| v = | 5.0 | m/s | |
| H = | 70 | m | |
| π = | 3.1416 | | |

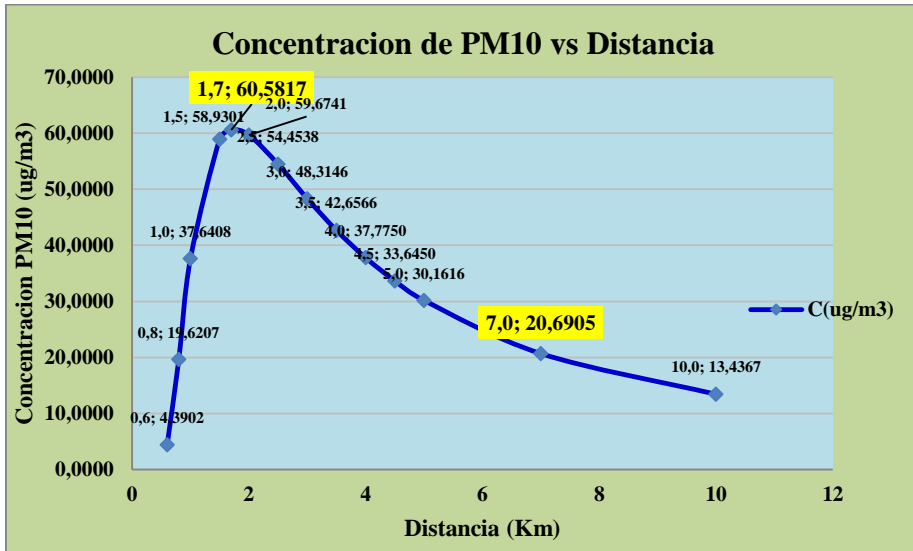
Tabla 13

Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Considerar las desviaciones de la (Tabla 4), septiembre-2024.

| X(km) | σ_y | σ_z | $A = \frac{Q}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v)}$ | $m = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2$ | B= exp(m) | $C\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = A * B$ |
|----------------|-----------------|-----------------|---|---|---------------|--|
| 0.6 | 43.1044 | 21.2244 | 1010.3887 | -5.44 | 0.0043 | 4.3902 |
| 0.8 | 54.7925 | 26.5409 | 635.6372 | -3.48 | 0.0309 | 19.6207 |
| 1.0 | 66.0000 | 31.5000 | 444.6223 | -2.47 | 0.0847 | 37.6408 |
| 1.5 | 92.5559 | 41.8559 | 238.6082 | -1.40 | 0.2470 | 58.9301 |
| P-1 1.7 | 102.7397 | 45.5156 | 197.6729 | -1.18 | 0.3065 | 60.5817 |
| 2.0 | 117.6530 | 50.6343 | 155.1664 | -0.96 | 0.3846 | 59.6741 |
| 2.5 | 141.7183 | 58.3998 | 111.6885 | -0.72 | 0.4876 | 54.4538 |
| 3.0 | 164.9921 | 65.4431 | 85.6089 | -0.57 | 0.5644 | 48.3146 |
| 3.5 | 187.6276 | 71.9374 | 68.4848 | -0.47 | 0.6229 | 42.6566 |
| 4.0 | 209.7307 | 77.9961 | 56.5081 | -0.40 | 0.6685 | 37.7750 |
| 4.5 | 231.3786 | 83.6980 | 47.7317 | -0.35 | 0.7049 | 33.6450 |
| 5.0 | 252.6300 | 89.1007 | 41.0658 | -0.31 | 0.7345 | 30.1616 |
| P-2 7.0 | 334.4689 | 108.4593 | 25.4814 | -0.21 | 0.8120 | 20.6905 |
| 10.0 | 450.3435 | 133.0024 | 15.4327 | -0.14 | 0.8707 | 13.4367 |

Figura 10

Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 13, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur.



Disertaciones interpretativas

Para interpretar las Tablas 11, 12 y 13 junto con las Figuras 8, 9 y 10, es importante considerar cómo las emisiones de partículas PM10 se dispersan y se atenúan conforme aumenta la distancia desde las fuentes fijas ubicadas en el sector industrial de la Panamericana Sur, así como las condiciones de estabilidad atmosférica del tipo D.

En función de estas consideraciones, a continuación, se analiza cada aspecto relevante que se desprende de la simulación:

- **Parámetros clave de Dispersión.** En estas Tablas se observa cómo los valores de las desviaciones estándar de dispersión horizontal (σ_y) y vertical (σ_z) aumentan con la distancia (X) desde el punto de emisión, lo que indica una mayor dispersión del contaminante PM10 en la atmósfera a medida que se aleja de la fuente.
- **Concentración de PM10 (C) y Atenuación con la Distancia.** Las concentraciones calculadas de PM10 (C en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se reducen considerablemente a medida que X aumenta, lo que es evidente en los valores de C que disminuyen en función de la distancia en cada tabla. Esta tendencia es consistente en los tres meses (julio, agosto y septiembre), mostrando un patrón de atenuación debido a la dispersión horizontal y vertical del contaminante, especialmente bajo condiciones de estabilidad D, las cuales son moderadamente neutrales y favorecen una dispersión limitada.
- **Efecto de las variaciones mensuales de la velocidad del Viento (v) y Emisión (Q).** Para este aspecto, se puede observar en las Tablas 11, 12 y 13, se puede observar cómo la concentración de PM10 disminuye en cada mes, aunque los valores específicos de Q (emisión) y v (velocidad del viento) presentan ligeras variaciones, lo que influye en las concentraciones resultantes. En agosto, con una velocidad del viento ligeramente superior (5.4 m/s) y una emisión de 15.01 g/s, se observa una mayor dispersión

y menores concentraciones en comparación con julio y septiembre.

- **Interpretación de las Figuras 8, 9 y 10 - Campanas de Gaussianas.** Las figuras representan gráficamente la dispersión de los contaminantes en un modelo de dispersión gaussiano, mostrando cómo la concentración de PM10 disminuye a medida que se aleja de la fuente en una curva gaussiana. La forma de las campanas de gaussianas en las Figuras 8, 9 y 10 refleja las variaciones en las concentraciones y la dispersión de PM10 para cada mes, ilustrando visualmente cómo la concentración máxima se encuentra más cerca de la fuente y se atenúa con la distancia debido a los procesos de dispersión.
- **Comparación con estándares de calidad del aire.** Las concentraciones estimadas de PM10 en las tablas muestran que, incluso cerca de la fuente y a distancias cortas, las concentraciones se encuentran por debajo del límite establecido de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según el D.S. N°003-2017-MINAM.

Valores aproximados de σ_y y σ_z , empleando nomogramas de Turner en función de la distancia en la dirección del viento y la clase de estabilidad D

Los valores aproximados de las desviaciones estándar σ_y y σ_z , obtenidos mediante los nomogramas de Turner, permiten estimar la

dispersión de contaminantes en función de la distancia en la dirección del viento bajo la clase de estabilidad D, que representa condiciones atmosféricas neutras. En este contexto, los nomogramas facilitan la identificación de patrones de dispersión horizontal (σ_y) y vertical (σ_z) que corresponden a escenarios en los que ni la mezcla ni la estabilidad son extremas.

| Datos (Jul-2024) | | | |
|-------------------------|--------|-----|--------------------------|
| Q = | 14.35 | g/s | 14350000 $\mu\text{g/s}$ |
| v = | 4.9 | m/s | |
| H = | 70 | m | |
| π = | 3.1416 | | |

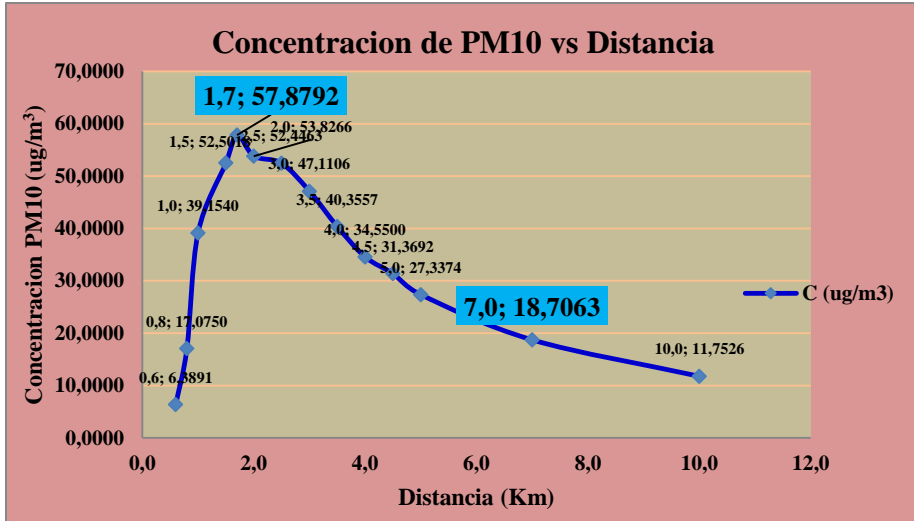
Tabla 14

Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Empleando nomogramas de Turner, julio-2024.

| X(km) | σ_y | σ_z | $A = \frac{Q}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v)}$ | $m = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2$ | $B = \exp(m)$ | $C\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = A * B$ |
|---------|------------|------------|---|---|---------------|--|
| 0.6 | 42 | 22 | 1008.8648 | -5.06 | 0.0063 | 6.3891 |
| 0.8 | 56 | 26 | 640.2615 | -3.62 | 0.0267 | 17.0750 |
| 1.0 | 68 | 32 | 428.4103 | -2.39 | 0.0914 | 39.1540 |
| 1.5 | 96 | 40 | 242.7658 | -1.53 | 0.2163 | 52.5018 |
| P-1 1.7 | 110 | 46 | 184.2333 | -1.16 | 0.3142 | 57.8792 |
| 2.0 | 130 | 50 | 143.4186 | -0.98 | 0.3753 | 53.8266 |
| 2.5 | 150 | 60 | 103.5801 | -0.68 | 0.5063 | 52.4463 |
| 3.0 | 170 | 64 | 85.6821 | -0.60 | 0.5498 | 47.1106 |
| 3.5 | 200 | 72 | 64.7376 | -0.47 | 0.6234 | 40.3557 |
| 4.0 | 230 | 80 | 50.6642 | -0.38 | 0.6819 | 34.5500 |
| 4.5 | 250 | 84 | 44.3915 | -0.35 | 0.7066 | 31.3692 |
| 5.0 | 280 | 90 | 36.9929 | -0.30 | 0.7390 | 27.3374 |
| P-2 7.0 | 370 | 110 | 22.9047 | -0.20 | 0.8167 | 18.7063 |
| 10.0 | 500 | 140 | 13.3174 | -0.13 | 0.8825 | 11.7526 |

Figura 11

Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 14, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur.



| Datos (Ago-2024) | | | |
|------------------|--------|-----|---------------|
| Q = | 15.01 | g/s | 14350000 µg/s |
| v = | 5.4 | m/s | |
| H = | 70 | m | |
| π = | 3.1416 | | |

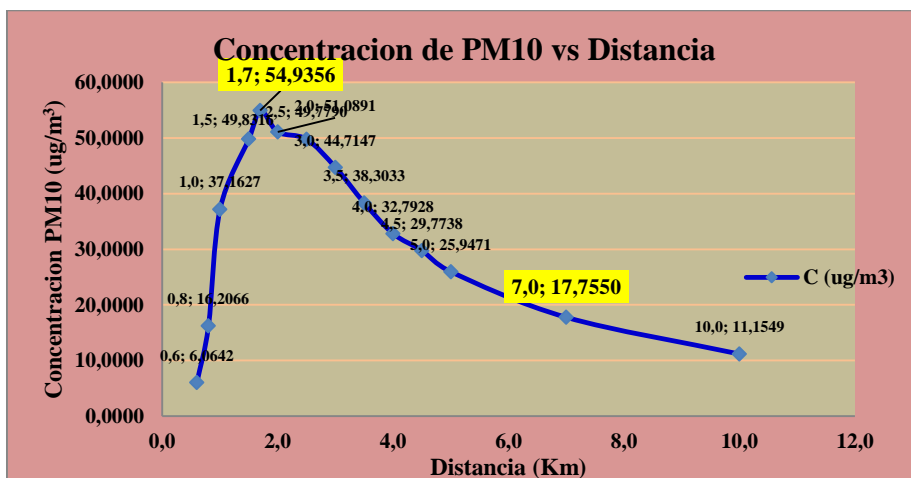
Tabla 15

Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Empleando nomogramas de Turner, agosto-2024.

| | X(km) | σ_y | σ_z | $A = \frac{Q}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v)}$ | $m = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2$ | $B = \exp(m)$ | $C\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = A * B$ |
|-----|-------|------------|------------|---|---|---------------|--|
| | 0.6 | 42 | 22 | 957.5558 | -5.06 | 0.0063 | 6.0642 |
| | 0.8 | 56 | 26 | 607.6990 | -3.62 | 0.0267 | 16.2066 |
| | 1.0 | 68 | 32 | 406.6221 | -2.39 | 0.0914 | 37.1627 |
| | 1.5 | 96 | 40 | 230.4192 | -1.53 | 0.2163 | 49.8316 |
| P-1 | 1.7 | 110 | 46 | 174.8636 | -1.16 | 0.3142 | 54.9356 |
| | 2.0 | 130 | 50 | 136.1246 | -0.98 | 0.3753 | 51.0891 |
| | 2.5 | 150 | 60 | 98.3122 | -0.68 | 0.5063 | 49.7790 |
| | 3.0 | 170 | 64 | 81.3244 | -0.60 | 0.5498 | 44.7147 |
| | 3.5 | 200 | 72 | 61.4451 | -0.47 | 0.6234 | 38.3033 |
| | 4.0 | 230 | 80 | 48.0875 | -0.38 | 0.6819 | 32.7928 |
| | 4.5 | 250 | 84 | 42.1338 | -0.35 | 0.7066 | 29.7738 |
| | 5.0 | 280 | 90 | 35.1115 | -0.30 | 0.7390 | 25.9471 |
| P-2 | 7.0 | 370 | 110 | 21.7398 | -0.20 | 0.8167 | 17.7550 |
| | 10.0 | 500 | 140 | 12.6401 | -0.13 | 0.8825 | 11.1549 |

Figura 12

Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 15, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur.



| Datos (Set-2024) | | | |
|------------------|--------|-----|---------------|
| Q = | 15.01 | g/s | 14350000 μg/s |
| v = | 5.4 | m/s | |
| H = | 70 | m | |
| π = | 3.1416 | | |

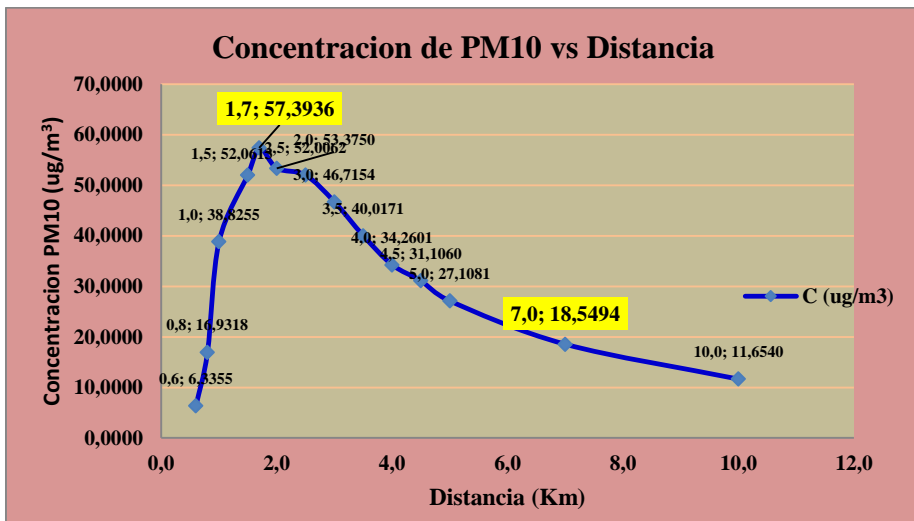
Tabla 16

Resultados de los valores estimados de emisiones de fuentes fijas, con estabilidad D. Empleando nomogramas de Turner, septiembre-2024.

| X(km) | σ_y | σ_z | $A = \frac{Q}{(\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v)}$ | $m = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2$ | B= exp(m) | $C\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = A * B$ |
|---------|------------|------------|---|---|---------------|--|
| 0.6 | 42 | 22 | 1000.4002 | -5.06 | 0.0063 | 6.3355 |
| 0.8 | 56 | 26 | 634.8895 | -3.62 | 0.0267 | 16.9318 |
| 1.0 | 68 | 32 | 424.8158 | -2.39 | 0.0914 | 38.8255 |
| 1.5 | 96 | 40 | 240.7290 | -1.53 | 0.2163 | 52.0613 |
| P-1 1.7 | 110 | 46 | 182.6876 | -1.16 | 0.3142 | 57.3936 |
| 2.0 | 130 | 50 | 142.2153 | -0.98 | 0.3753 | 53.3750 |
| 2.5 | 150 | 60 | 102.7110 | -0.68 | 0.5063 | 52.0062 |
| 3.0 | 170 | 64 | 84.9632 | -0.60 | 0.5498 | 46.7154 |
| 3.5 | 200 | 72 | 64.1944 | -0.47 | 0.6234 | 40.0171 |
| 4.0 | 230 | 80 | 50.2391 | -0.38 | 0.6819 | 34.2601 |
| 4.5 | 250 | 84 | 44.0190 | -0.35 | 0.7066 | 31.1060 |
| 5.0 | 280 | 90 | 36.6825 | -0.30 | 0.7390 | 27.1081 |
| P-2 7.0 | 370 | 110 | 22.7125 | -0.20 | 0.8167 | 18.5494 |
| 10.0 | 500 | 140 | 13.2057 | -0.13 | 0.8825 | 11.6540 |

Figura 13

Muestra los resultados obtenidos de la Tabla 16, de los valores estimados de las emisiones de las fuentes fijas del sector industrial, Panamericana Sur.



Disertaciones interpretativas

Para analizar la dispersión atmosférica de contaminantes provenientes de fuentes industriales fijas, los datos proporcionados utilizan nomogramas de Turner para estimar las desviaciones estándar horizontales (σ_y) y verticales (σ_z) en función de **la distancia del viento** para la clase de estabilidad D (condiciones neutras). Este enfoque permite que un modelo de dispersión gaussiana estime la concentración de PM10 en áreas circundantes a las fuentes de emisión, considerando las condiciones atmosféricas típicas en zonas industriales a lo largo de la Panamericana Sur.

Para cada mes (julio, agosto y septiembre de 2024), se realizaron cálculos de emisiones con parámetros como tasa de emisión (Q), velocidad del viento (v) y altura de chimenea (H). Las Tablas resumen los resultados para diferentes distancias (X), detallando los valores de σ_y y σ_z derivados de los nomogramas de Turner, así como los cálculos para la concentración (C) de contaminantes. Esta concentración (C) se deriva a través de la fórmula gaussiana (Ecu 3).

Las Figuras que aparecen después de cada Tabla ilustran las concentraciones de emisiones estimadas a distintas distancias. Estos resultados son fundamentales para evaluar el impacto de las fuentes fijas en la calidad del aire y ayudan a orientar las decisiones regulatorias para el control de la contaminación en entornos industriales.

- La Figura 10 muestra el patrón de dispersión para julio de 2024, que indica cómo varía la concentración de contaminantes con la distancia en las condiciones meteorológicas dadas.
- La Figura 11 proporciona información similar para agosto de 2024.
- La Figura 12 ilustra los datos de septiembre de 2024, lo que permite una comparación de los patrones de emisión a lo largo de los meses y ayuda a identificar tendencias en la dispersión de contaminantes en función de las variaciones estacionales.

Verificación de las conjeturas o Hipótesis. Con los datos obtenidos se procedió a realizar la verificación de los supuestos indagatorios pres establecidos:

H₀: “La aplicación de un modelo gaussiano simplificado NO contribuye a estimar la dispersión de PM10 en las áreas industriales de la Panamericana Sur, Pisco, Ica, Perú”, ($\mu \geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

H_a: “La aplicación de un modelo gaussiano simplificado contribuye a estimar la dispersión de PM10 en las áreas industriales de la Panamericana Sur, Pisco, Ica, Perú”, ($\mu < 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Se planteó la hipótesis para los puntos del monitoreo: PUNTO-1 y PUNTO-2

“Se consideró el nivel de significancia”

“ $\alpha = 0.05$ ”

“Se estimó el estadístico de prueba (Estadística Descriptiva)”

| Numero aleatorios | Columna | |
|-------------------|----------------------------|----------------|
| 57.0681 | Media | 57.5216 |
| 54.1657 | Error típico | 0.7593 |
| 56.5893 | Mediana | 57.3936 |
| 61.0943 | Desviación estándar | 2.2780 |
| 57.9871 | Varianza de la muestra | 5.1892 |
| 60.5817 | Coficiente de asimetría | 0.2503 |
| 57.8792 | Rango | 6.9286 |
| 54.9356 | Mínimo | 54.1657 |
| 57.3936 | Máximo | 61.0943 |
| | Suma | 517.6946 |
| | Cuenta | 9 |
| | Nivel de confianza (95.0%) | 1.7510 |

Se estableció la regla de decisión

| | |
|------------|------|
| $\mu =$ | 100 |
| $\alpha =$ | 0.05 |
| $n =$ | 9 |
| $gl =$ | 8 |

“Se resuelve el t-Student experimental”

“ $t_{\text{Experimental}} = -55.9421$ ”

“La distribución del $t_{\text{Teórico}} = -1.8600$ ”

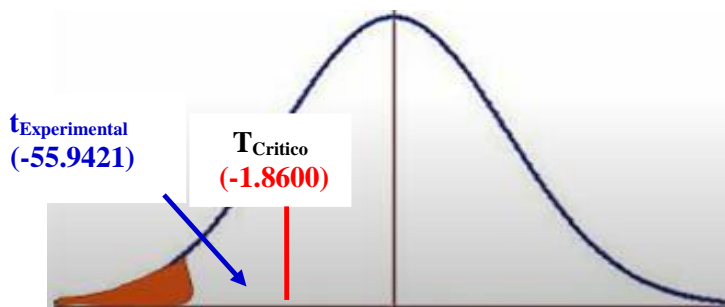
(ANEXO 1: Distribución t de Student, $gl = 8$ y $\alpha = 0.05$)”

Entonces,

“Si $t_{\text{Experimental}} (-55.9421) > t_{\text{Teórico}} (-1.8600)$ entonces **SE RECHAZA H_0** ”

Figura 14

*Distribución de t-Student para el monitoreo del PM10, de tres meses.
Puntos-1 y Punto.2.*



Se afirma, que:

Dado que el valor t experimental de -55.9421 cae dentro de la región de aceptación, existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula con un T crítico de 1.8600. Esto implica que se acepta H_a : “La aplicación de un modelo gaussiano simplificado contribuye a estimar la dispersión de PM10 en las áreas industriales de la Panamericana Sur, Pisco, Ica”.

Esto indica que una contribución significativa de la dispersión de PM10 desde las fuentes en las áreas industriales de la Panamericana Sur a la calidad del aire en la comunidad de Bellavista, Caserío de Santa Cruz, Distrito de San Andrés, Pisco, Ica. Además, con un valor p menor al nivel de significancia de 0.05, se concluye que la concentración promedio de PM10 en el aire, estimada en $57.5216 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no supera el límite de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en el D.S. N°003-2017-MINAM. Este resultado, basado en las evaluaciones realizadas en los puntos de monitoreo PUNTO-01 y PUNTO-02, confirma que los niveles de PM10 no representan un riesgo inmediato para la salud humana. Sin embargo, la dirección predominante del viento (NE) puede influir en “la dispersión de estas partículas, por lo que es fundamental continuar con el monitoreo y adoptar medidas de mitigación para preservar la calidad del aire y la salud pública en la región de Ica”.

3.4.1 Discusión de resultados

La estimación de la dispersión de PM10 en áreas industriales mediante un modelo gaussiano simplificado se alinea con investigaciones previas que destacan su eficacia para predecir patrones de distribución de contaminantes en ambientes industriales y urbanos. Turner (2014) planteó que los modelos gaussianos son herramientas clave para evaluar la influencia de fuentes emisoras puntuales en función de variables meteorológicas como la dirección del viento y la estabilidad atmosférica. Esta metodología ha sido ampliamente reconocida por su simplicidad y capacidad para proporcionar resultados confiables en condiciones donde los recursos para modelamiento avanzado son limitados.

Estudios realizados en otras regiones industriales refuerzan la relevancia de este enfoque. Raheja et al. (2021) aplicaron un modelo gaussiano para simular la dispersión de PM10 en zonas urbanas de India, demostrando que estos modelos pueden identificar áreas críticas afectadas por material particulado y orientar políticas de mitigación. De manera similar, Alifa et al. (2020) identificaron que los patrones de dispersión de PM10 están altamente influenciados por las condiciones meteorológicas locales, lo que confirma la necesidad de incorporar datos climáticos precisos en los análisis, especialmente en áreas cercanas a fuentes emisoras.

En América Latina, Brusca et al. (2015) destacaron la utilidad de los modelos gaussianos en estudios de calidad del aire para evaluar el impacto de fuentes industriales y urbanas. En Colombia, se ha utilizado este enfoque para caracterizar la dispersión de PM10 en ciudades industriales, señalando la necesidad de integrar datos continuos de emisiones y monitoreo ambiental para mejorar las proyecciones tal como lo reflejan Fedossova et al. (2019).

Además, la evaluación del impacto en comunidades cercanas resalta la importancia de este tipo de investigaciones para la salud pública. Azmi et al. (2023) sostienen que el modelamiento de partículas suspendidas permite identificar riesgos potenciales en áreas urbanas e industriales, contribuyendo al desarrollo de estrategias preventivas y planes de acción que alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Desde un enfoque metodológico, el presente estudio aporta evidencia sobre la viabilidad de implementar herramientas accesibles para monitoreo ambiental, particularmente en contextos de economías emergentes. Esto es relevante, considerando que en Perú y otros países de la región, la limitada capacidad técnica y económica para implementar modelos avanzados puede ser una barrera significativa para la gestión ambiental eficaz.

La investigación también subraya la necesidad de fomentar el monitoreo continuo y la validación de modelos simplificados con datos

empíricos actualizados, fortaleciendo así la capacidad local para la gestión de la calidad del aire y la salud pública en regiones con actividad industrial intensa.

Conclusiones

El modelo gaussiano simplificado demostró ser una herramienta eficaz para estimar la dispersión de PM10 en áreas industriales, ofreciendo una aproximación accesible y confiable para evaluar patrones de contaminación en función de factores meteorológicos y características geográficas locales. Su uso permitió obtener una visión clara de la dinámica del material particulado en las áreas evaluadas, sentando las bases para estudios más avanzados y específicos.

La aplicación de este modelo contribuye significativamente a la gestión ambiental local, especialmente en contextos donde los recursos técnicos y económicos son limitados. Al proporcionar resultados claros y accionables, el modelo permite a las autoridades ambientales priorizar medidas de mitigación y diseñar políticas fundamentadas en evidencia científica, mejorando la capacidad de respuesta ante problemas de contaminación.

Desde una perspectiva de salud pública, aunque las concentraciones de PM10 no superaron los límites establecidos por las normativas nacionales, los resultados destacan la importancia de mantener una vigilancia continua en las áreas industriales. Esto es esencial para prevenir riesgos a largo plazo asociados a la exposición

prolongada al material particulado y garantizar un entorno seguro para las comunidades cercanas.

Finalmente, la investigación subraya la relevancia de abordar problemas ambientales con un enfoque sostenible. La relación entre la actividad industrial y la calidad del aire identificada en este estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promoviendo acciones que beneficien tanto al medio ambiente como a la salud de las personas. Además, se sugiere integrar modelos más complejos y ampliar el monitoreo a otras fuentes de contaminación para profundizar en el análisis y asegurar una gestión ambiental aún más efectiva.

Recomendaciones

Es fundamental implementar un monitoreo continuo de la calidad del aire en las áreas industriales de la Panamericana Sur, utilizando tecnologías avanzadas y modelos complementarios al gaussiano simplificado. Esto permitirá analizar con mayor precisión los patrones de dispersión de contaminantes y responder de manera más eficiente a los desafíos ambientales identificados.

Se recomienda que las autoridades locales diseñen políticas públicas y estrategias de gestión ambiental basadas en los resultados obtenidos. Estas medidas deben priorizar la reducción de emisiones en puntos críticos, fomentar prácticas industriales sostenibles y asegurar el cumplimiento de las normativas ambientales para proteger la calidad del aire en la región.

Ampliar el alcance de futuros estudios para incluir otras fuentes de contaminación, como el tráfico vehicular y las actividades agrícolas, es clave para obtener una visión más integral. Este enfoque ayudará a identificar sinergias y relaciones entre múltiples fuentes de emisión, fortaleciendo las estrategias de mitigación en un contexto regional.

Adicionalmente, se sugiere fomentar la capacitación de personal técnico y de las autoridades locales en el uso de herramientas de modelamiento y monitoreo de contaminantes. Esto no solo fortalecerá la capacidad regional para gestionar la calidad del aire, sino que también promoverá la sostenibilidad a largo plazo en la región.

Por último, es crucial desarrollar campañas de sensibilización dirigidas a las comunidades cercanas a las áreas industriales. Estas campañas deben informar sobre los riesgos asociados a la exposición al PM10, destacar las acciones preventivas necesarias y promover la participación ciudadana en la vigilancia ambiental.

Referencias bibliográficas

- Alifa, M., Bolster, D., Mead, M. I., Latif, M. T. y Crippa, P. (2020). The Influence of meteorology and emissions on the spatio-temporal variability of PM10 in Malaysia. *Atmos. Res.*, 246, 105107. doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105107.
- Alfaro Alejo, R. y Gonzales Gonzales, E.V.A. (2008). *Estadística y probabilidades para ingenieros*, (1ra ed.). Universidad Nacional del Altiplano.
- Ambuludi, R. y Carvajal, V. (2022). Estimación de gas metano utilizando el modelo LandGEM del relleno sanitario de residuos sólidos municipales Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador. *Revista Tecnología*, 35(1), 67-78. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822022000100067
- Ardilla, M., Farias, L. y Mora, M (2018). *Fundamentos investigativos*, (1ra ed.). Arquidiócesis de Tunja.
- Azmi, W. N. F. W., Pillai, T. R., Latif, M. T., Koshy, S. y Shaharudin, R. (2023). Application of Land use Regression Model to Assess Outdoor air Pollution Exposure: A review. *Environ. Adv.*, 11, 100353. doi: 10.1016/j.envadv.2023.100353.
- Balakrishnaiah y otros. (2011). Characterization of PM, PM10 and PM2.5 mass concentrations at a tropical semiarid station in Anantapur, India. *Indian J. Radio Sp. Phys.*, 40(2), 95–104.
- Bahlali, M. y Petit, Q. (2024). An equilibrium model of city with atmospheric pollution dispersion. *J. Math. Econ.*, 111, 102943.

doi: 10.1016/j.jmateco.2024.102943.

- Ballesteros, F. (2023). *Implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de la calidad del aire*. Universidad Autónoma de Bucaramanga: Bucaramanga. cromotion://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14337/2021_Tesis_Fabian_Ballesteros.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bello, A. y Reyes, J. (2021). *Estudio de sistema de ventilación forzada para dilución de humos metálicos de soldadura en interior de pilotes hincados en la construcción del terminal portuario general de San Martín*. Universidad Científica del Sur.
- Bian, Z., Ren, C., Wang, D. y Cao, S. J. (2024). Spatial-Temporal Analysis of Urban air Pollution Related Exposure and Health Impacts: Driving Human-Centered Regulation and Control. *Urban Clim.*, 58, 102161. doi: 10.1016/j.uclim.2024.102161.
- Brusca, S., Famoso, F., Lanzafame, R., Mauro, R., Garrano, A. M. C. and Monforte, P. (2016). Theoretical and Experimental Study of Gaussian Plume Model in Small Scale System. *Energy Procedia*, 101, 58–65. doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.008.
- Brusca, S., Famoso, F., Lanzafame, R., Mauro, R., Garrano, A. M. C. and Monforte, P. (2015) Experimental analysis of a plume dispersion around obstacles. *Energy Procedia*, vol. 82, pp. 695–701. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.794.
- Bustillos Ortis, A. A. (2011). *Simulación de la dispersión de contaminantes en el aire de la ciudad de Ambato emitidos por fuentes fijas y por la actividad del volcán Tungurahua, mediante la utilización de los softwares ambientales especializados dispersión 5.2 y screen view*. Universidad Técnica de Ambato.
- Cabrera Fernández, J. (2012). *Aplicación de un modelo de dispersión atmosférica*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

- Cardona-Vargas, A. J., Echeverri-Urbe, C., Zapata-López, J., Jaramillo-Álvarez, J., Arrieta-González, C. y Amell-Arrieta, A. (2020). Cálculo de propiedades de combustión y análisis de estabilidad de llama para el gas límite 65%CH₄ + 35%H₂. *Rev. Ingenio*, 17(1), 1–8. doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2328>
- Castañeda, J. y Santana, S. (2022). *Diseño del sistema de aire acondicionado y ventilación mecánica para el hotel Barcelona en la ciudad de Montería en el departamento de Córdoba, basado en el estándar Ashrae 62.1.*
- Carrasco Diaz, S. (2019). *Metodología de la investigación científica metodología de la investigación científica. Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación.*
- Coronel Farez, D. F., y Toasa Reyes, P. V. (2024). Evolución de la ventilación mecánica en la contaminación ambiental en su relación con las emisiones contaminantes producidas a través del proceso de soldadura SMAW en el Campus Ochoa León del Instituto Superior Tecnológico Ismael Pérez Pazmiño. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 2632-2643. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12510
- Dai y otros. (2015). “Characterization and Source Identification of Heavy metals in Ambient PM₁₀ and PM_{2.5} in an Integrated Iron and Steel Industry Zone Compared with a Background Site,” *Aerosol Air Qual. Res.*, 15(3), 875–887. doi: 10.4209/aaqr.2014.09.0226.
- Dávila Córdoba y otros.(2020). “Association of PM_{2.5} concentration with health center outpatient visits for respiratory diseases of children under 5 years old in Lima, Peru,” *Environ. Heal. A Glob. Access Sci. Source*, 19(1), 1–6. doi: 10.1186/s12940-020-

0564-5.

D.S. N°074-2001-PCM, “Decreto Supremo N ° 074-2001-PCM (2001). Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire,” *Norma Ambiente*. Presidente de la República, Lima, Perú, pp. 1–16.

Ebrahimi-Khusfi, Z., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kazemi, M. y Nafarzadegan, A. R. (2021). Predicting the ground-level pollutants concentrations and identifying the influencing factors using machine learning, wavelet transformation, and remote sensing techniques. *Atmos. Pollut. Res.*, 12(5), 15. doi: 10.1016/j.apr.2021.101064.

Espinoza Morales, G. y Jiménez Melo, J. (2024). *Validación experimental de dos modelos matemáticos para determinar la solubilidad de oxígeno en biorreactores a las condiciones atmosféricas de Huancayo*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/10333/T010_72391227_T%20-%20T010_72454297_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Fedossova, A., Fedosov, V. V. y Britto, R. A. (2019). Dispersion of Particles of Industrial Emissions in the Problem of Semi-Infinite Optimization of Contaminated Area. *Inf. Technol.*, 30(1), 333–343. doi: 10.4067/S0718-07642019000100333.

Gariazzo, C., Papaleo, V., Pelliccioni, A., Calori, G., Radice, P. y Tinarelli, G. (2007). Application of a Lagrangian particle model to assess the impact of harbour, industrial and urban activities on air quality in the Taranto area, Italy. *Atmos. Environ.*, 41(30), 6432–6444. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.06.005.

Hernández-Sampieri, R. y Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.

- Huang, W., Long, E., Wang, J., Huang, R. and Ma, L. (2015). “Characterizing spatial distribution and temporal variation of PM10 and PM2.5 mass concentrations in an urban area of Southwest China,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 6, no. 5, pp. 842–848. doi: 10.5094/APR.2015.093.
- Husaini, D. C., Reneau, K., Balam, D. (2022). Air Pollution and Public Health in Latin America and the Caribbean (LAC): a Systematic Review With Meta-Analysis. *Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci.*, 11, 8. doi: 10.1186/s43088-022-00305-0.
- Kim, K. H., Kabir, E. y Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ. Int.*, 74, 136–143. doi: 10.1016/j.envint.2014.10.005.
- Lara Muñoz, E. (2011). *Fundamentos de Investigación*, (1ra ed.) Alfaomega Grupo Editor.
- Lamb, B., Lorenzen, A. y Shair, F. (1979). “Atmospheric dispersion and transport within coastal regions-I. Tracer study of power plant emissions from the oxnard plain,” *Atmos. Environ.*, 13(4), 567. doi: 10.1016/0004-6981(79)90157-4.
- Leelőssy, Á., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I. y R. Mészáros, R. (2014). “Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review,” *Cent. Eur. J. Geosci.*, 6(3), 257–278. doi: 10.2478/s13533-012-0188-6.
- Ley General del Ambiente, “Ley General del Ambiente - Ley N° 28611. Artículo 67. Artículo 119, Inciso 119.1,” *Peruano*. p. 168.
- Ma, X., Zhong, W. Feng, W. y Li, G. (2017). Modelling of pollutant dispersion with atmospheric instabilities in an industrial park, *Powder Technol.*, 314, 577–588. 10.1016/j.powtec.2016.08.062.

- Martínez-Salcedo, C. A., Ramón-Valencia, J. A. y Pedroza-Rojas, A. O. (2024). Estimación de emisiones y modelización del comportamiento ambiental de los gases de efecto invernadero para un relleno sanitario”, *Rev. Ingenio*, 21(1), 36-44. <https://doi.org/10.22463/2011642X.4172>
- Mauricio Meléndez, J. E. y Murga Valdez, L. J. (2015). “Empleo de un modelo gaussiano para estimar las concentraciones máximas a nivel del suelo de CO, NOx, PM10 y SO2 emitidas por las chimeneas de los calderos 17 y 20 de la empresa Cartavio S.A.A. – 2014,” 10, 122.
- MINAM (2017). “Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias,” *El Perú.*, 6–9.
- Modelos de contaminación atmosférica (2014). Modelos de contaminación atmosférica. Modelos de difusión. Modelo Gaussiano. Coeficientes de dispersión y altura efectiva de chimeneas. *Ingeniería del Medio Ambiente*, 3, [Online]. <https://ingmedioambiente.blogspot.com/2014/08/modelos-de-contaminacion-atmosferica.html>
- Moscoso Vanegas, D., Astudillo Alemán, A. y Morales Pérez, M. C. (2018). Inventario de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes fijas de combustión del parque industrial del cantón Cuenca-Ecuador. *Cent. Azúcar*, 45(2), 33–45.
- Muñoz, R., Macías, T. y Hernández, A. (2021). Sistema de extracción de humos de soldadura en la industria. *Dominio de las Ciencias*, 7(4), 2023-2044.
- Nakhle, P., Stamos, I., Proietti, P. and Siragusa, A. (2024). Environmental Monitoring in European Regions Using the Sustainable Development Goals (SDG) Framework, *Environ. Sustain. Indic.*, 21, 14. doi: 10.1016/j.indic.2023.100332.

- Omote, J., y Romero, K. (2020). *Evaluación de la concentración de oxígeno con difusores de burbuja fina y gruesa en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Onat, B., Bayat, C. y Sahin, U. (2004). PM10 dispersion modeling: Urban case study from Turkey. *Fresenius Environ. Bull.*, 13(9), 889–894.
- Organización Mundial de la Salud (2013). *Guías de Calidad del Aire - Actualización Mundial 2005*. WHO. [Online]. https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/es/
- Orru, H., Lövenheim, B., Johansson, C. y Forsberg, B. (2015). “Potential health impacts of changes in air pollution exposure associated with moving traffic into a road tunnel,” *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 25(5), 524–531. doi: 10.1038/jes.2015.24.
- Pasquill, F. (1979). Atmospheric dispersion modeling. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 29(2), 117–119. doi: 10.1080/00022470.1979.10470764.
- Patel, U. R., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A. y Burgess, A. (2024). Digital Twin Technology for Sustainable Urban Development: A Review of its Potential Impact on SDG 11 in New Zealand. *Cities*, 155, 1–13. doi: 10.1016/j.cities.2024.105484.
- Perdiz Dávila, J. M. (2016). *Modeling and Simulation of the dispersion of pollutants in the plume of a chimney by the Gaussian Dispersion Method*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Quintero, J. y Fares, A. (2023). Propuesta de diseño de un sistema de extracción de humos metálicos y gases para un taller de soldadura de una empresa camaronera en Guayaquil”, Universidad Politécnica Salesiana.

- Raheja et al.,(2021). “Modeling and simulation of urban air quality with a 2-phase assessment technique,” *Simul. Model. Pract. Theory*, 109, 102281. doi: 10.1016/j.simpat.2021.102281.
- Rice, M., Balmes, J., Malhotra, A., Castner, J., García, E., Hicks, A., Shankar, H., y Ckrider, M. (2021). Outdoor air pollution and your health. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 204(7), P13–P14. <https://doi.org/10.1164/rccm.2046P13>
- Rojas, F.J., Pacsi-Valdivia, S. and Sánchez-Ccoyllo, O. R. (2022). Simulación Computacional e influencia de las variables meteorológicas en las concentraciones de PM10 y PM2.5 en Lima Metropolitana. *Inf. tecnológica*, 33(3), 223–238. doi: 10.4067/s0718-07642022000300223.
- Rovira, J., Vilavert, L., Nadal, M., Schuhmacher, M. y Domingo, J. L. (2015). Temporal trends in the levels of metals, PCDD/Fs and PCBs in the vicinity of a municipal solid waste incinerator. Preliminary assessment of human health risks, *Waste Manag.*, 43, 168–175. doi: 10.1016/j.wasman.2015.05.039.
- Sharma, A. Saxena, A., Sethi, M., Shree, V. and Varun, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 15(1) 871–875. doi: 10.1016/j.rser.2010.09.008.
- Sofán, S., Ruíz, A., Arrieta, J. y Doria, M. (2023). Evaluación energética de la formación de biogás obtenido a partir de residuos sólidos municipales procedentes del relleno sanitario utilizando el modelo LandGEM. *Investigación e Innovación en Ingeniería*, 11(2), 16-27. <https://revistas.unisimon.edu.co/index.php/innovacioning/articloe/view/6373>
- Supo, J. (2015). *Cómo escribir una tesis: Redacción del informe final de tesis*, (1ra ed.) Bioestadístico Eirl.

- Tuna Tuygun, G., Gündoğdu, S. and Elbir, T. (2021). Estimation of ground-level particulate matter concentrations based on synergistic use of MODIS, MERRA-2 and AERONET AODs over a coastal site in the Eastern Mediterranean. *Atmos. Environ.*, 261, 15. doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118562.
- Turner, B. (2014). *Atmospheric dispersion estimates an introduction to dispersion modeling*, (2da ed). Taylor & Francis. [Online]. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780138733704/workbook-atmospheric-dispersion-estimates-bruce-turner>
- Tyovenda, A. A., Ayua, T. J. and Sombo, T. (2021). Modeling of gaseous pollutants (CO and NO₂) emission from an industrial stack in Kano city, northwestern Nigeria. *Atmos. Environ.*, 253(2) 118356. doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118356.
- Vara Licona, M. E. (2005). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Dedicatoria. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 2016.
- Van De Beek y otros. (2021). Spatial and Spatiotemporal Variability of Regional Background Ultrafine Particle Concentrations in the Netherlands. *Environ. Sci. Technol.*, 55, 2, 1067–1075. doi: 10.1021/acs.est.0c06806.
- Wark, K. and Warner, C. (2012). *Contaminación del aire: origen y control*. Limusa.
- World Health Organization (2024). *Compendium of WHO and Other UN Guidance on Health and Environment, update*. Ginebra, Suiza: PNUD, UN Environment Y UNICEF. [Online]. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/352844/WHO-HEP-ECH-EHD-22.01-eng.pdf>

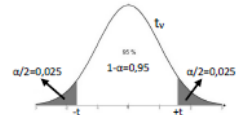
World Health Organization. (2016). *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization.

Zhou, X., Aurell, J., Mitchell, W., Tabor, D. and Gullett, B. (2017). A small, lightweight multipollutant sensor system for ground-mobile and aerial emission sampling from open area sources. *Atmos. Environ.*, *154*, 31–41. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.029.

Anexo

Distribución t de Student

Contiene los valores de t tales que $\frac{\alpha}{2} = P(t_v \geq t)$, donde v son los Grados de Libertad



| | | $\alpha/2$ | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|------------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0,0005 | 0,001 | 0,005 | 0,01 | 0,025 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,45 | 0,475 |
| v grado de libertad | 1 | 636,619 | 318,309 | 63,657 | 31,821 | 12,706 | 6,314 | 3,078 | 1,376 | 1,000 | 0,727 | 0,325 | 0,158 | 0,079 |
| | 2 | 31,599 | 22,327 | 9,925 | 6,965 | 4,303 | 2,920 | 1,886 | 1,061 | 0,816 | 0,617 | 0,289 | 0,142 | 0,071 |
| | 3 | 12,924 | 10,215 | 5,841 | 4,541 | 3,182 | 2,353 | 1,638 | 0,978 | 0,765 | 0,584 | 0,277 | 0,137 | 0,068 |
| | 4 | 8,610 | 7,173 | 4,604 | 3,747 | 2,776 | 2,133 | 1,533 | 0,941 | 0,741 | 0,569 | 0,271 | 0,134 | 0,067 |
| | 5 | 6,869 | 5,893 | 4,032 | 3,365 | 2,571 | 2,015 | 1,476 | 0,920 | 0,727 | 0,559 | 0,267 | 0,132 | 0,066 |
| | 6 | 5,959 | 5,208 | 3,707 | 3,143 | 2,447 | 1,943 | 1,440 | 0,906 | 0,718 | 0,553 | 0,265 | 0,131 | 0,065 |
| | 7 | 5,408 | 4,785 | 3,499 | 2,998 | 2,365 | 1,893 | 1,415 | 0,896 | 0,711 | 0,549 | 0,263 | 0,130 | 0,065 |
| | 8 | 5,041 | 4,501 | 3,355 | 2,896 | 2,306 | 1,861 | 1,397 | 0,889 | 0,706 | 0,546 | 0,262 | 0,130 | 0,065 |
| | 9 | 4,781 | 4,297 | 3,250 | 2,821 | 2,262 | 1,833 | 1,393 | 0,883 | 0,703 | 0,543 | 0,261 | 0,129 | 0,064 |
| | 10 | 4,587 | 4,144 | 3,169 | 2,764 | 2,228 | 1,812 | 1,372 | 0,879 | 0,700 | 0,542 | 0,260 | 0,129 | 0,064 |
| | 11 | 4,437 | 4,025 | 3,106 | 2,718 | 2,201 | 1,796 | 1,363 | 0,876 | 0,697 | 0,540 | 0,260 | 0,129 | 0,064 |
| | 12 | 4,318 | 3,930 | 3,055 | 2,681 | 2,179 | 1,782 | 1,356 | 0,873 | 0,695 | 0,539 | 0,259 | 0,128 | 0,064 |
| | 13 | 4,221 | 3,852 | 3,012 | 2,650 | 2,160 | 1,771 | 1,350 | 0,870 | 0,694 | 0,538 | 0,259 | 0,128 | 0,064 |
| | 14 | 4,140 | 3,787 | 2,977 | 2,624 | 2,145 | 1,761 | 1,345 | 0,868 | 0,692 | 0,537 | 0,258 | 0,128 | 0,064 |
| | 15 | 4,073 | 3,733 | 2,947 | 2,602 | 2,131 | 1,753 | 1,341 | 0,866 | 0,691 | 0,536 | 0,258 | 0,128 | 0,064 |
| | 16 | 4,015 | 3,686 | 2,921 | 2,583 | 2,120 | 1,746 | 1,337 | 0,865 | 0,690 | 0,535 | 0,258 | 0,128 | 0,064 |
| | 17 | 3,965 | 3,646 | 2,898 | 2,567 | 2,110 | 1,740 | 1,333 | 0,863 | 0,689 | 0,534 | 0,257 | 0,128 | 0,064 |
| | 18 | 3,922 | 3,610 | 2,878 | 2,552 | 2,101 | 1,734 | 1,330 | 0,862 | 0,688 | 0,534 | 0,257 | 0,127 | 0,064 |
| | 19 | 3,883 | 3,579 | 2,861 | 2,539 | 2,093 | 1,729 | 1,328 | 0,861 | 0,688 | 0,533 | 0,257 | 0,127 | 0,064 |
| | 20 | 3,850 | 3,552 | 2,845 | 2,528 | 2,086 | 1,725 | 1,325 | 0,860 | 0,687 | 0,533 | 0,257 | 0,127 | 0,063 |
| | 21 | 3,819 | 3,527 | 2,831 | 2,518 | 2,080 | 1,721 | 1,323 | 0,859 | 0,686 | 0,532 | 0,257 | 0,127 | 0,063 |
| | 22 | 3,792 | 3,505 | 2,819 | 2,508 | 2,074 | 1,717 | 1,321 | 0,858 | 0,686 | 0,532 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 23 | 3,768 | 3,485 | 2,807 | 2,500 | 2,069 | 1,714 | 1,319 | 0,858 | 0,685 | 0,532 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 24 | 3,745 | 3,467 | 2,797 | 2,492 | 2,064 | 1,711 | 1,318 | 0,857 | 0,685 | 0,531 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 25 | 3,725 | 3,450 | 2,787 | 2,485 | 2,060 | 1,708 | 1,316 | 0,856 | 0,684 | 0,531 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 26 | 3,707 | 3,435 | 2,779 | 2,479 | 2,056 | 1,706 | 1,315 | 0,856 | 0,684 | 0,531 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 27 | 3,690 | 3,421 | 2,771 | 2,473 | 2,052 | 1,703 | 1,314 | 0,855 | 0,684 | 0,531 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 28 | 3,674 | 3,408 | 2,763 | 2,467 | 2,048 | 1,701 | 1,313 | 0,855 | 0,683 | 0,530 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 29 | 3,659 | 3,396 | 2,756 | 2,462 | 2,045 | 1,699 | 1,311 | 0,854 | 0,683 | 0,530 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 30 | 3,646 | 3,385 | 2,750 | 2,457 | 2,042 | 1,697 | 1,310 | 0,854 | 0,683 | 0,530 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 31 | 3,633 | 3,375 | 2,744 | 2,453 | 2,040 | 1,696 | 1,309 | 0,853 | 0,682 | 0,530 | 0,256 | 0,127 | 0,063 |
| | 32 | 3,622 | 3,365 | 2,738 | 2,449 | 2,037 | 1,694 | 1,309 | 0,853 | 0,682 | 0,530 | 0,255 | 0,127 | 0,063 |
| | 33 | 3,611 | 3,356 | 2,733 | 2,445 | 2,035 | 1,692 | 1,308 | 0,853 | 0,682 | 0,530 | 0,255 | 0,127 | 0,063 |
| | 34 | 3,601 | 3,348 | 2,728 | 2,441 | 2,032 | 1,691 | 1,307 | 0,852 | 0,682 | 0,529 | 0,255 | 0,127 | 0,063 |
| | 35 | 3,591 | 3,340 | 2,724 | 2,438 | 2,030 | 1,690 | 1,306 | 0,852 | 0,682 | 0,529 | 0,255 | 0,127 | 0,063 |
| α | 0,001 | 0,002 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,95 | |

ISBN: 978-9942-679-31-4



9789942679314