

Análisis hidráulico del flujo de cuencas naturales y canales artificiales mediante el programa

HEC-RAS

***Pedro Córdova Mendoza
Teresa Oriele Barrios Mendoza
Ramiro Zuzunaga Morales
Isis Cristel Córdova Barrios
Edy Estefanie Pardo Moran
Emily Zuzunaga Concha***

**ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL FLUJO DE
CUENCAS NATURALES Y CANALES
ARTIFICIALES MEDIANTE EL PROGRAMA
HEC-RAS**



ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL FLUJO DE CUENCAS NATURALES Y CANALES ARTIFICIALES MEDIANTE EL PROGRAMA HEC-RAS



Autores

Pedro Córdova Mendoza
Teresa Oriele Barrios Mendoza
Ramiro Zuzunaga Morales
Isis Cristel Córdova Barrios
Edy Estefanie Pardo Moran
Emily Zuzunaga Concha

Análisis hidráulico del flujo de cuencas naturales y canales artificiales mediante el programa HEC-RAS

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

DERECHOS RESERVADOS

Copyright © 2022
Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador
Guayaquil, Ecuador
Tel.: + (593) 04 2037524
<http://www.cidecuador.com>

ISBN: 978-9942-844-71-2
Impreso y hecho en Ecuador

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: marzo, 2022



Guayaquil - Ecuador

Este libro ha sido revisado por pares externos

Carmen Luisa Vázquez

<https://orcid.org/0000-0002-0657-3470>

PAR 1 y Registro

Antonio Caravacas

<https://orcid.org/0000-0002-3361-1719>

PAR 2 y Registro

Catalogación en la fuente

Análisis hidráulico del flujo de cuencas naturales y canales artificiales mediante el programa HEC-RAS / Pedro Córdova Mendoza, Teresa Oriole Barrios Mendoza, Ramiro Zuzunaga Morales, Isis Cristel Córdova Barrios, Edy Estefanie Pardo Moran, Emily Zuzunaga Concha. -- Ecuador: Editorial CIDE, 2022

93 p.: mapas; 21 x 29, 7 cm.

ISBN: 978-9942-844-71-2

1. Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Semblanza de los Autores



Pedro Córdova-Mendoza, Dr.

Ciencias del Medio Ambiente, Ingeniería de Procesos.

Nació en Ica. Docente Principal de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria - Universidad Nacional "San Luis Gonzaga". Ingeniero Químico. Magíster en Ingeniería Mecánica y Eléctrica con mención en Ingeniería del Gas Natural. Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Docente del Doctorado en Ciencia, Medio Ambiente y Tecnología - Universidad Nacional del Altiplano. Docente del Doctorado en Gestión Ambiental - Universidad Nacional "San Luis Gonzaga". Líder en la línea de investigación: Recursos Hídricos, Riesgo de Desastres y Cambio Climático - Universidad Nacional "San Luis Gonzaga". Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas. Ganador de premios nacionales en el campo de la investigación.



Teresa Orielle Barrios- Mendoza, Dra.

Ciencias del Medio Ambiente, Ingeniería de Procesos.

Nació en Ica. Docente Principal de la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica - Universidad Nacional "San Luis Gonzaga". Ingeniero Químico. Maestría en Investigación y Docencia Universitaria. Doctora en Administración y Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Expositora nacional e internacional en temas de Investigación y Gestión Ambiental. Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas. Ganadora de premios nacionales en el campo de la investigación.



Ramiro Zuzunaga-Morales, Dr.

Ciencias del Medio Ambiente, Ingeniería de Procesos.

Nació en Abancay-Apurímac. Docente Universitario de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga". Ingeniero Químico. Egresado como Ingeniero Civil - Universidad San Antonio Abad del Cuzco. Magíster en Energía y Medio Ambiente. Doctor en Gestión Ambiental - Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica y también presta servicios en la Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental en funciones de Protección del Ambiente y Vigilancia Sanitaria.



Isis Cristel Córdova-Barrios, Dra. candidata

Ciencias del Medio Ambiente, Ingeniería de Procesos

Nació en Ica. Docente Auxiliar de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Universidad Nacional "San Luis Gonzaga". Ingeniero Ambiental y Sanitario. Magíster Scientiae en Ingeniería Química con mención en Seguridad Industrial y Ambiental - Universidad Nacional del Altiplano-Puno. Egresada del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Realiza actividades académicas como Docente Universitario en la Universidad Autónoma de Ica y Universidad Tecnología del Perú. Especialista en Sistemas Integrado de Gestión y Auditora Ambiental. Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas. Fue Vocal en el Capítulo de Ingeniería Ambiental y Sanitario del Colegio de Ingenieros del Perú Base Regional Ica.



Edy Estefanie Pardo Moran, Bach Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Ciencias del Medio Ambiente, Ingeniería de Procesos

Nació en Ica. Egresada de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria - Universidad San Luis Gonzaga de Ica. Especialista en el manejo de software de Modelamiento y Simulación Hidráulica HEC-RAS. Realiza actividades de colaboración en los trabajos de investigación y publicación de artículos científicos en temas ambientales y proyectos de conservación y cuidado del medio ambiente.



Emily Zuzunaga-Concha, Bach Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Ciencias del Medio Ambiente, Ingeniería de Procesos

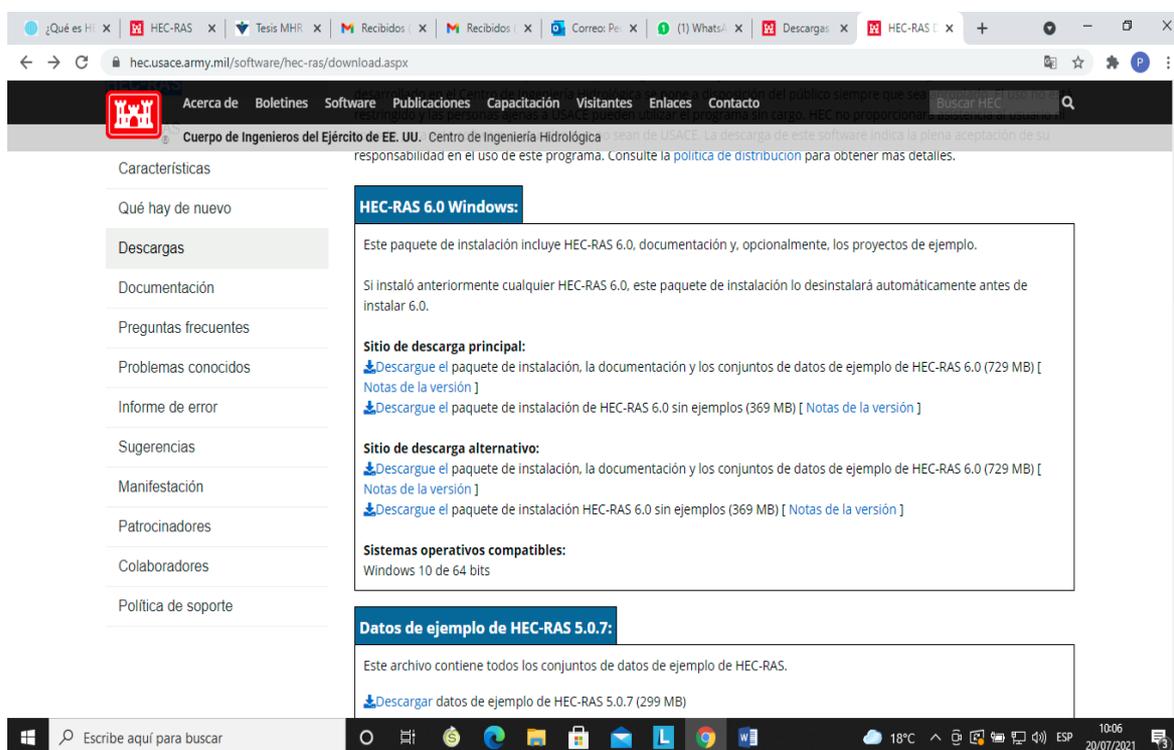
Nació en Ica. Egresada de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria - Universidad San Luis Gonzaga de Ica. Especialista en el manejo de Software de Modelamiento y Simulación Hidráulica HEC-RAS. Realiza actividades de colaboración en los trabajos de investigación y publicación de artículos científicos en temas ambientales y proyectos de conservación y cuidado del medio ambiente.

Acerca de HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) permite realizar planteamientos en base al análisis que permite realizar modelamiento hidráulico en una sola dimensión, por lo tanto, muestran solo información lineal y está compuesto por 4 tipos de análisis en ríos:

- Modelización de flujo en régimen permanente.
- Modelización de flujo en régimen no permanente.
- Modelización del transporte de sedimentos.
- Análisis de la calidad del agua. (GEASIG, 2016)

HEC-RAS ha sido desarrollado para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de USA (USACE). Sin embargo, el software desarrollado en el Centro de Ingeniería Hidrológica se pone a disposición del público siempre que sea apropiado. El uso no está restringido y las personas ajenas a USACE pueden utilizar el programa sin cargo. HEC no proporcionará asistencia al usuario ni soporte para este software a usuarios que no sean de USACE. La descarga de este software indica la plena aceptación de su responsabilidad en el uso de este programa. Consulte la política de distribución para obtener más detalles (US Army Corps of Engineers, 1986).



The screenshot shows a web browser window displaying the HEC-RAS download page. The browser's address bar shows the URL: hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx. The page header includes the USACE logo and navigation links: [Acerca de](#), [Boletines](#), [Software](#), [Publicaciones](#), [Capacitación](#), [Visitantes](#), [Enlaces](#), and [Contacto](#). A search bar labeled "Buscar HEC" is also present. The main content area features a sidebar with navigation options: [Características](#), [Qué hay de nuevo](#), [Descargas](#) (highlighted), [Documentación](#), [Preguntas frecuentes](#), [Problemas conocidos](#), [Informe de error](#), [Sugerencias](#), [Manifestación](#), [Patrocinadores](#), [Colaboradores](#), and [Política de soporte](#). The main content area is titled "HEC-RAS 6.0 Windows:" and contains the following information: "Este paquete de instalación incluye HEC-RAS 6.0, documentación y, opcionalmente, los proyectos de ejemplo." It also states: "Si instaló anteriormente cualquier HEC-RAS 6.0, este paquete de instalación lo desinstalará automáticamente antes de instalar 6.0." Under "Sitio de descarga principal:", there are two download links: "Descargue el paquete de instalación, la documentación y los conjuntos de datos de ejemplo de HEC-RAS 6.0 (729 MB) [Notas de la versión]" and "Descargue el paquete de instalación de HEC-RAS 6.0 sin ejemplos (369 MB) [Notas de la versión]". Under "Sitio de descarga alternativo:", there are two more download links: "Descargue el paquete de instalación, la documentación y los conjuntos de datos de ejemplo de HEC-RAS 6.0 (729 MB) [Notas de la versión]" and "Descargue el paquete de instalación HEC-RAS 6.0 sin ejemplos (369 MB) [Notas de la versión]". The "Sistemas operativos compatibles:" section lists "Windows 10 de 64 bits". Below this, there is a section titled "Datos de ejemplo de HEC-RAS 5.0.7:" which states: "Este archivo contiene todos los conjuntos de datos de ejemplo de HEC-RAS." and provides a download link: "Descargar datos de ejemplo de HEC-RAS 5.0.7 (299 MB)". The browser's taskbar at the bottom shows the Windows Start button, a search bar, and various application icons, along with system tray information: 18°C, 10:06, and 20/07/2021.

Nota. About HEC. HEC-RAS, (US Army Corps of Engineers, 1986)

Instalación del programa

El programa se instala siguiendo las siguientes indicaciones:

- 1 Dirigirse a la página web oficial del US Army Corps of Engineers <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/download.aspx>
- 2 Buscar la opción “Downloads” donde se mostrará una lista de las versiones existentes del software. Cabe destacar que la descarga es completamente gratuita.
- 3 Una vez elegida la versión, se descarga.
- 4 Se efectuará la descarga del archivo “HEC-RAS_6.1_Setup.exe”.
- 5 Una vez terminada la descarga, se sigue el proceso de instalación habitual de los programas.
- 6 Culminada la instalación, ya se puede acceder.

Dedicatoria

Dedicamos este proyecto a nuestros padres, hijos y esposas, por su comprensión, dado que el tiempo empleado a los estudios para el progreso personal y académico de esta ardua labor docente, a veces nos impide dedicarles el tiempo que merecen, para dedicarnos a la preparación cognitiva que exige nuestra profesión.

A nuestros colegas docentes, por su colaboración y ánimo, para seguir en la lucha, y estar a la par de las exigencias con los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) visión hasta el 2030, para alcanzar estas metas; hemos entendido y comprendido como educadores en el área ambiental y sanitaria, que nos ha permitido tener un mejor predisposición en brindarle a los estudiantes una educación de calidad sobre los recursos hídricos y consecuentemente el conocimiento del comportamiento de las cuencas hidrológicas, que es una condición indispensable para la vida en la Tierra y que resulta esencial para el desarrollo sostenible, por lo que estamos eternamente agradecidos.

Este libro está dirigido a los estudiantes de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Ingeniería Civil y carreras afines estudiantes de posgrado en Ciencia, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Gestión Ambiental, que colaboraron en las actividades de su preparación, y estuvieron dispuestos a las necesidades de los docente, gracias mil gracias por su tiempo, ya que deseamos que todo quede perfecto y que el conocimiento sea recíproco, también es bueno decir que hemos aprendido mucho de ustedes que nos han permitido ampliar los conocimientos sobre el análisis hidráulico del flujo de cuencas naturales y canales artificiales mediante el programa HEC-RAS.

Los Autores

Contenido

Semblanza de los autores.....	6
Acerca de HEC-RAS.....	8
Dedicatoria.....	10
Prólogo.....	15
Introducción.....	16
Capítulo 1	
Fundamentos teóricos: modelación hidráulica unidimensional con HEC-RAC.....	18
1. Fundamentos teóricos.....	19
1.1. HEC-RAS.....	19
1.2. Cálculo unidimensional.....	19
1.3. Coeficiente de rugosidad de Manning.....	20
1.4. Flujos en canales abiertos.....	23
1.4.1. Tipos de flujos en canales abiertos.....	23
1.4.1.1. Flujo permanente.....	23
1.4.1.2. Flujo no permanente.....	23
1.4.1.3. Flujo crítico, subcrítico y supercrítico.....	24
1.5. Período de retorno.....	24
Capítulo 2	
Fundamentos de aplicación del programa	27
2. Fundamentos de aplicación del programa	27
2.1. Aplicaciones del programa	27
2.2. Características generales del programa y aplicación en un modelamiento	27
2.2.1. Pantalla Principal de HEC - RAS.....	27
2.3. Desarrollo de un modelamiento hidráulico con HEC – RAS	29
2.3.1. Definir el sistema de unidades del proyecto.....	29
2.3.2. Crear un nuevo proyecto.....	31
2.3.3. Caracterización de la geometría.....	33
2.3.3.1. Definición del esquema del río.....	33
2.3.3.2. Introducir datos de las secciones transversales.....	34
2.3.3.3. Introducir datos de separación de la sección aguas abajo.....	36
2.3.3.4. Introducir el coeficiente de rugosidad de Manning.....	36
2.3.3.5. Introducir los datos de los bancos.....	37
2.3.3.6. Introducir datos de los coeficientes de contracción y expansión.....	38
2.3.3.7. Guardar los datos geométricos.....	39
2.3.4. Caudales y condiciones de contorno de flujo permanente.....	40
2.3.4.1. Introducir datos del caudal.....	40
2.3.4.2. Introducir las condiciones de contorno.....	40
2.3.5. Guardar los datos de caudales y condiciones de contorno.....	41
2.3.6. Plan para flujo permanente y ejecutar el modelamiento.....	42
2.3.6.1. Crear plan.....	43
2.3.6.2. Archivos de geometría y caudal.....	43
2.3.6.3. Tipo de régimen.....	43
2.3.6.4. Ejecutar la simulación.....	44
2.3.7. Visualizar los resultados.....	44
2.3.7.1. Gráfico del perfil longitudinal.....	45
2.3.7.2. Gráfico de las secciones transversales.....	45

2.3.7.3. Perspectivas 3D.....	46
2.3.7.4. Tablas de las secciones transversales.....	47
2.3.7.5. Tablas simplificadas para los perfiles.....	47

Capítulo 3

Desarrollo del modelo hidráulico.....	50
3. Aplicación de un modelo hidráulico con HEC-RAS, Civil 3d y Google Earth	50
3.1. Metodología.....	51
3.2. Civil 3D.....	51
3.3. HEC- RAS.....	61
3.4. Resultados del modelamiento.....	73
3.4.1. Perfil de flujo en perspectiva 3D.....	73
3.4.2. Secciones transversales.....	74
3.4.3. Perfiles longitudinales.....	75
3.4.4. Tablas detalladas en secciones transversales.....	75
3.4.5. Tablas simplificadas para perfiles.....	76
3.5. Google Earth.....	77
Referencias.....	82
Anexos.....	85

Índice de tablas

Tabla 1. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n)	20
Tabla 2. Valores de períodos de retorno de diseño recomendado.....	25
Tabla 3. Herramientas del Programa HEC-RAS.....	28
Tabla 4. Coeficiente de contracción y expansión.....	38
Tabla 5. Valores de período de retorno (años)	51
Tabla 6. Valores de rugosidad según Manning.....	51

Índice de figuras

Figura 1. Representación de los términos del balance de energía (trinomio de Bernoulli)....	19
Figura 2. Ventana Principal HEC-RAS.....	28
Figura 3. Sistema de Unidades.....	30
Figura 4. Ventana de selección de sistema de unidades.....	30
Figura 5. Configuraciones adicionales del programa.....	31
Figura 6. Ventana para crear New Project.....	31
Figura 7. Ventana New Project.....	32
Figura 8. Ventana para asignar el nombre del archivo.....	32
Figura 9. Ventana con el proyecto creado.....	33
Figura 10. Ventana de datos geométricos.....	34
Figura 11. Ventana de secciones transversales.....	34
Figura 12. Aplicación de coordenadas correspondientes a las secciones	35
Figura 13. Representación de coordenadas de la sección transversal.....	35
Figura 14. Ventana Downstream Reach Lenghts.....	36
Figura 15. Representación gráfica de separación entre las secciones.....	36
Figura 16. Ventana Manning's n Values.....	36
Figura 17. Representación gráfica de los coeficientes de rugosidad de Manning.....	37
Figura 18. Ventana Channel Bank Stations.....	37
Figura 19. Representación gráfica de datos de los bancos.....	38
Figura 20. Ventana Cont/Exp Coefficient (Steady Flow)	38
Figura 21. Datos para una sección transversal.....	39

Figura 22. Ventana para guardar los datos geométricos.....	39
Figura 23. Ventana para ingreso de caudales.....	40
Figura 24. Ventana de condiciones de contorno.....	41
Figura 25. Ventana para guardar los datos de caudales y condiciones de contorno.....	42
Figura 26. Ventana para crear el plan y ejecutar el modelo.....	42
Figura 27. Ventana para crear el plan.....	43
Figura 28. Ventana de geometría y caudales.....	43
Figura 29. Ventana elección del tipo de régimen.....	44
Figura 30. Ventana con la ejecución de la simulación.....	44
Figura 31. Ventana visualización de los resultados.....	45
Figura 32. Gráfico del perfil longitudinal.....	45
Figura 33. Gráfico de las secciones transversales.....	46
Figura 34. Perspectiva 3D.....	46
Figura 35. Salida detallada de la sección transversal.....	47
Figura 36. Tabla de resumen de perfiles.....	48
Figura 37. Topografía del río Oquish.....	52
Figura 38. Ventana Drawing Setting.....	52
Figura 39. Ventana de Layer Properties.....	53
Figura 40. Ventana para crear la Superficie.....	53
Figura 41. Ventana para añadir curvas de nivel.....	54
Figura 42. Delimitación de la zona de trabajo.....	54
Figura 43. Simular trayectoria del eje de río.....	55
Figura 44. Eje del río	55
Figura 45. Ventana Create Alignment from objects	56
Figura 46. Ventana de modificaciones.....	57
Figura 47. Secciones transversales.....	58
Figura 48. Corrección de las secciones.....	58
Figura 49. Ventana Sample Line.....	59
Figura 50. Ventana Sample Line Tools.....	59
Figura 51. Secciones transversales.....	60
Figura 52. Márgenes del río.....	60
Figura 53. Barra Civil 3D.....	61
Figura 54. Ventana de Exportar.....	61
Figura 55. Sistemas de unidades.....	61
Figura 56. Ventana Nuevo Proyecto.....	62
Figura 57. Ventana Geometric Data.....	62
Figura 58. Ventana de importar datos.....	63
Figura 59. Ventana Import Geometry Data.....	63
Figura 60. Ventana de Import Geometry Data.....	64
Figura 61. Ventana Import Geometry Data.....	64
Figura 62. Secciones transversales en el programa HEC-RAS.....	65
Figura 63. Ventana Geometric Data.....	65
Figura 64. Ventana sección Transversal Point Filter.....	66
Figura 65. Resultado del filtro.....	66
Figura 66. Asignación de los valores de la n de Manning.....	67
Figura 67. Ventana Cross Section Data.....	68
Figura 68. Ventana para guardar la geometría.....	68
Figura 69. Entrada de datos de caudal, ventana Steady Flow Data.....	69
Figura 70. Ventana de condiciones de contorno en el HEC-RAS.....	70
Figura 71. Ventana para guardar caudales y condiciones de contorno.....	70
Figura 72. Ventana de análisis de flujo no permanente.....	71

Figura 73. Proceso de Simulación.....	71
Figura 74. Perspectiva tridimensional de la Simulación.....	72
Figura 75. Ventana Editor Gráfico de secciones transversales.....	72
Figura 76. Ventana Bank Station Tools.....	73
Figura 77. Ventana Add Level.....	73
Figura 78. Vista 3D de las secciones transversales del río Oquish, para la simulación de TR=50 años.....	74
Figura 79. Sección transversal del río Oquish, para la simulación de TR=100 años.....	74
Figura 80. Perfil de flujo de la simulación.....	75
Figura 81. Tabla detallada de salida.....	76
Figura 82. Perfil tabla de salida.....	76
Figura 83. Ventana Gis Data.....	77
Figura 84. Ventana de conversión de Lamina HEC-RAS.....	78
Figura 85. Lámina exportada del programa HEC-RAS.....	78
Figura 86. Ventana de las láminas con sistema de unidades métricas.....	79
Figura 87. Ventana Load/Unload Applications.....	79
Figura 88. Ventana de salida.....	80
Figura 89. Láminas de agua en Google Earth.....	80
Figura 90. Tirantes de profundidad de los períodos de retorno.....	81

Prólogo

Este libro ha sido concebido con el principal propósito de complementar los textos de la especialidad de la gestión integral de los recursos hídricos y el manejo de los fluidos e hidráulica. Se basa en la convicción y experiencia teórico práctica y académica de los autores, donde el esclarecimiento y comprensión de los principios fundamentales del comportamiento de los cuerpos hídricos se obtienen mejor mediante las aplicaciones ilustrativas.

Las actividades económicas que se desarrollan en las poblaciones demográficas relacionados con el agua natural afectan a todos los estratos de la sociedad y a todos los sectores del desarrollo económico. El crecimiento demográfico, el rápido proceso de urbanización e industrialización, la expansión de la agricultura y el turismo y el cambio climático, ejercen una presión cada vez mayor sobre el agua natural y de proceso.

La importancia sobre los recursos hídricos pone de manifiesto las interdependencias hidrológicas, sociales, económicas y ecológicas que existen en las cuencas hidrográficas y pone de manifiesto la relación binomial entre las partes que componen los ecosistemas hídricos y el estado para asegurar la sostenibilidad eco sistémica y de contribuir con los objetivos de desarrollo sostenible(ODS).

Para entender lo complejo de la naturaleza en la gestión del agua es necesario abordarlo con un enfoque integrado de gestión de recursos hídricos a nivel nacional y de cuenca, donde esto permitirá mejorar la gobernabilidad de los recursos de agua dulce.

El texto está dirigido a todos los actores estudiantes y profesionales que necesitan herramientas con respecto a la gestión del agua para implementar sistemas de previsión como el de mitigar los impactos de peligros naturales, suministrar agua para fines productivos (agricultura, industria, energía, transporte, turismo, pesca, etc.), suministrar agua para fines sociales (servicios de la salud y vivienda) y proteger el medio ambiente. Deben, por lo tanto, atender los conflictos acerca de cuestiones relacionados con los recursos hídricos entre muchos usuarios diferentes.

Esperamos que esta contribución permita catalizar el cambio positivo para el desarrollo sostenible y finalmente la adopción de una gestión mejorada y más sostenible de los recursos hídricos con mejores prácticas de gestión del agua para las cuencas de todo el mundo.

Los Autores

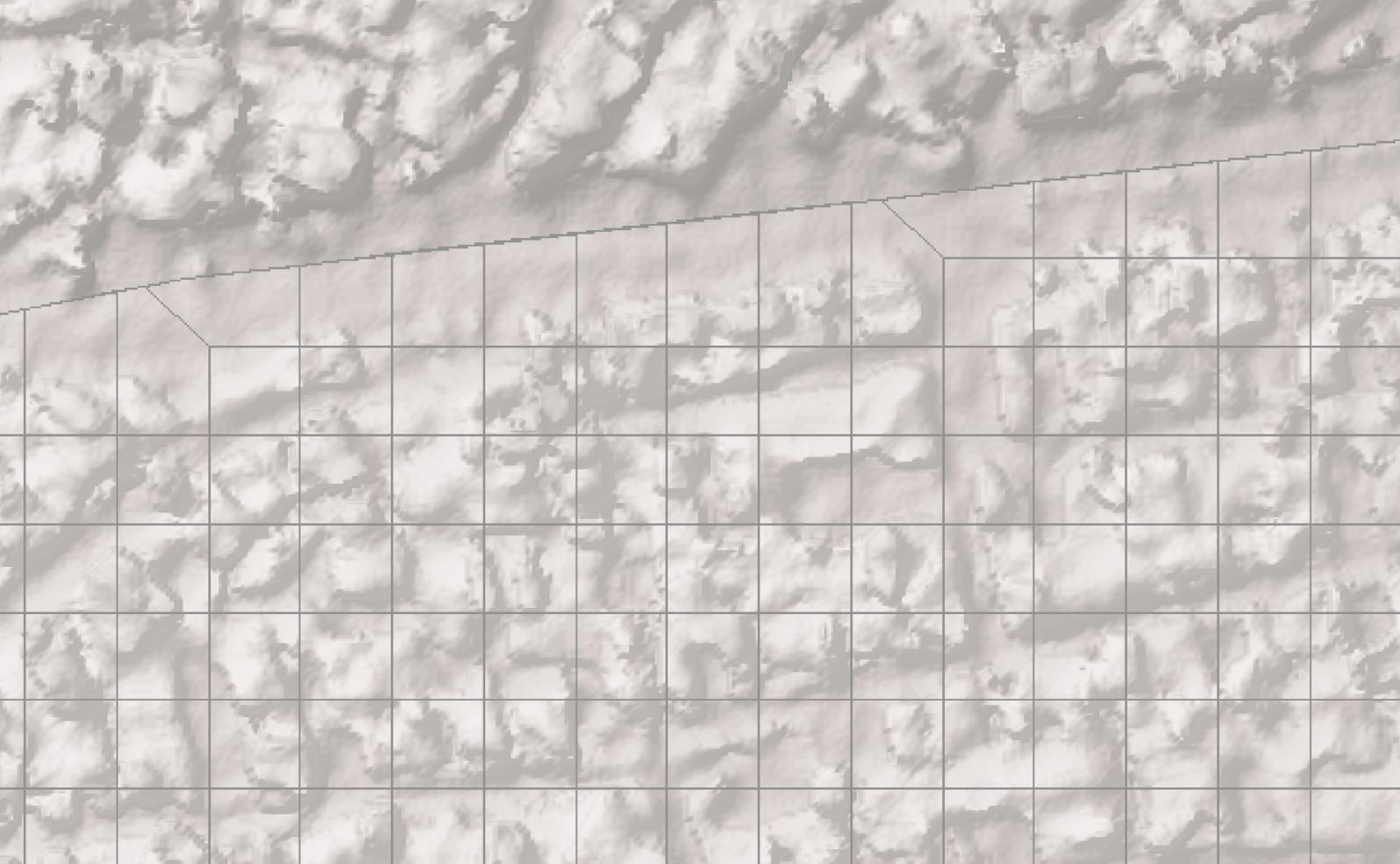
Introducción

Análisis hidráulico del flujo de cuencas naturales y canales artificiales mediante el programa HEC-RAS está conformado por tres capítulos importantes donde el lector podrá pasearse por la aplicación y ejecución del programa HEC-RAS conociendo sus fundamentos teóricos, así como la modelación hidráulica unidimensional con el mismo, tópicos tratados como el cálculo unidimensional, coeficiente de rugosidad de Manning, flujos de canales abiertos, tipos de canales y período de retorno.

Seguidamente, se desarrolla el capítulo referente a los fundamentos de aplicación del programa, sus características generales y aplicación en un modelamiento, destacando la pantalla principal de HEC-RAS, definición del sistema de unidades del proyecto, creación de un nuevo proyecto, caracterización de la geometría, caudales y condiciones de contorno de flujo permanente, cómo guardar los datos caudales y condiciones de contorno, plan para flujo permanente y ejecución del modelamiento, cerrando con la visualización de los resultados.

En la tercera parte de esta investigación, se puede apreciar la aplicación de un modelo hidráulico con HEC-RAS, CIVIL 3D y GOOGLE EARTH, indicando las metodologías, los resultados del modelamiento: perfil de flujo en perspectiva 3D, secciones transversales, perfiles longitudinales, tablas detalladas en secciones transversales y tablas simplificadas para perfiles.

Sirva este aporte realizado a la gestión integral de los recursos hídricos, fortalecer los conocimientos a los interesados en el tema tratado.



Capítulo 1

Fundamentos teóricos:
modelación hidráulica
unidimensional con HEC-RAC

Capítulo 1

Fundamentos teóricos: modelación hidráulica unidimensional con HEC-RAC

Los investigadores Xue et al., (2021) expresan que la crisis del agua en todo el mundo ha ejercido una gran presión sobre el desarrollo social debido a la necesidad de equilibrar su consumo entre una economía sostenible y un ecosistema en funcionamiento. Asimismo sostienen que la información en el modelado integrado basado en procesos es una herramienta eficaz para comprender mejor los complejos mecanismos de los problemas del agua a escala de cuenca.

Considerando que todavía es relativamente difícil simular los procesos de cantidad-calidad de agua simultáneamente, este estudio propone un modelo integrado marco mediante el acoplamiento de un modelo hidrológico con uno de calidad, tomando como ejemplo la cuenca del río Xiaoqing, en la provincia de Shandong, en el norte de China, donde los investigadores emplearon un modelo de calidad de agua hidrodinámica unidimensional con HEC-RAS, para investigar su capacidad tanto en la simulación como en la calidad a escala de la cuenca (Xue et al., 2021).

Ahora bien, de acuerdo a (Brunner & CEIWR-HEC., 2016) **HEC-RAS** es un software del Centro de Ingeniería Hidrológica Analysis System (HEC) Río (HEC-RAS) el cual permite realizar en una sola dimensión constante y cálculos hidráulica de los ríos de flujo no estacionario 1D y 2D. Es además, un sistema integrado de software diseñado para el uso interactivo de un entorno de red multiusuario multitarea. El sistema se compone de una interfaz gráfica de usuario (GUI), componentes de análisis hidráulicos separados, almacenamiento de datos y capacidades de gestión, gráficos e instalaciones de informes

En cuanto a **CIVIL 3D** su uso logra generar superficies, secciones transversales, alineamientos, perfiles, anotaciones, etc; vinculándose dinámicamente, agilizando y facilitando la evaluación de múltiples alternativas, la toma de mejores decisiones y la producción de planos actualizados (Esarte, 2020) .

Finalmente, **GOOGLE EARTH** el cual es un programa informático similar a un Sistema de Información Geográfico que permite ver imágenes en 3 dimensiones del planeta Tierra combinando imágenes satelitales, mapas y el buscador de Google. Las imágenes son suministradas por la compañía Digital Globe. Esta empresa tiene un satélite llamado QuikBird, cuyas imágenes vende a cualquier parte del mundo. La resolución (cm/píxeles) de las mismas depende del lugar en del planeta en que se tomen, siendo mayor en general en zonas de mayor concentración de población. El QuikBird es el satélite de mayor resolución en la actualidad. Fue puesto en órbita el 18 de octubre por la NASA a unos 450 km de la superficie aprox. Sus sensores adquieren datos multispectrales y pancromáticos simultáneamente sobre espacios que pueden alcanzar 165 km de longitud en una sola pasada. (<http://www.uruguayeduca.edu.uy/>)

1. Fundamentos teóricos

1.1. HEC-RAS

El Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los USA (US Army Corps of Engineers) desarrolló el software de modelamiento HEC-RAS que permite simular el flujo de agua de ríos, cauces naturales o artificiales bajo condiciones de régimen permanente y no permanente (Ahmed, 2008).

El HEC-RAS permite el cálculo de los perfiles de agua y de parámetros hidráulicos de cauces. El programa puede simular un simple tramo de un río o una red completa. El análisis del flujo se puede realizar mediante régimen subcrítico, supercrítico o mixto (Villón, 2014).

1.2. Cálculo unidimensional

Para la estimación de perfiles de la superficie de agua se considera la ecuación del balance de energía (trinomio de Bernoulli) (figura 1) desde una primera sección transversal a la segunda (Bladé et al., 2009).

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Donde:

Z_1 y Z_2 =Elevación del canal principal (m)

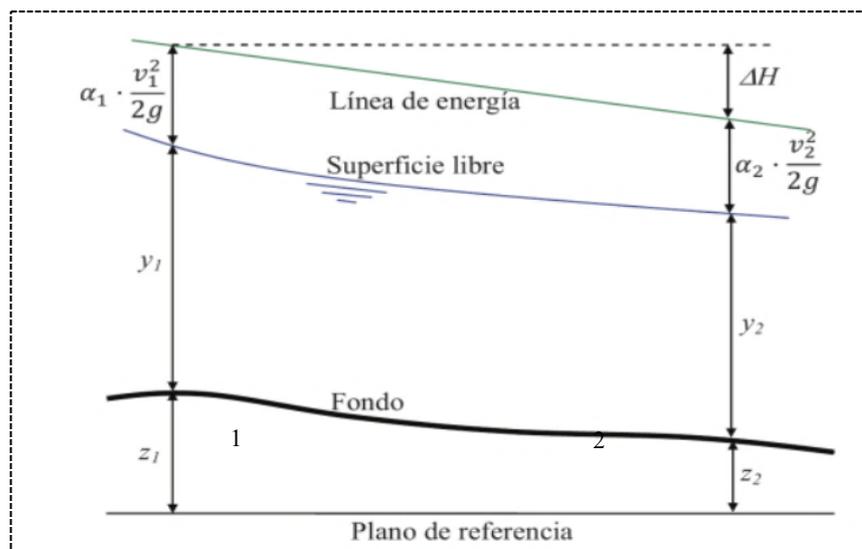
Y_1 y Y_2 =Tirante de la sección Transversal(m)

α_1 y α_2 = Coeficientes de ponderación de velocidad (Coeficiente de Coriolis = 1.0)

h_e =Pérdida de energía (m)

Figura 1

Representación de los términos del balance de energía (trinomio de Bernoulli).



Nota. Tomado de Bladé, E., Sánchez-Juny, H., Sánchez, P., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC-RAS*. Edicions UPC.

1.3. Coeficiente de rugosidad de Manning

De acuerdo con Chow (1994) el coeficiente de rugosidad de Manning calcula las pérdidas de carga continua que se producen en los cauces debido a varios factores asociados como los cambios de las secciones, vegetación, geomorfología, irregularidades del cauce, etc. Todos estos factores generan el incremento de la rugosidad de Manning.

Para el modelo hidráulico con HEC-RAS se requiere ingresar valores de Manning(n) tanto en simulaciones con flujo permanente y no permanente. Estos valores se modificarán basándose en la información de campo que se disponga, el comportamiento y las características del cauce (Materón et al., 2006).

Cabe señalar que, cuando los datos del coeficiente no estén disponibles, los valores se tomarán de datos experimentales de diversas fuentes. En tal sentido, Chow (1994) desarrolla una extensa compilación de n valores como guía para todo tipo de canales.

Adicional a las tablas, se tiene las fotografías publicadas en algunos textos mediante el cual se podrá establecer comparaciones en función de la familiaridad con el aspecto, geometría y las características del canal, con el fin de mejorar la capacidad para seleccionar los coeficientes de rugosidad correctos. En los libros de los autores (Barnes (1967) "*Roughness characteristics of natural channels*" (U.S Geological Survey Water-Supply) y el libro de Chow (1994) "*Open-Channel Hydraulics*" se encuentran estas imágenes referenciales.

En la tabla 1, se detalla los valores para varios tipos de canales.

Tabla 1

Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n)

Tipos de canal y descripción		Mínimo	Normal	Máximo
A. Corrientes naturales.				
1. Ríos en planicie.				
a.	Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos.	0.025	0.030	0.033
b.	Igual al anterior, pero con más piedras y malezas.	0.030	0.035	0.040
c.	Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena.	0.033	0.040	0.045
d.	Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras.	0.035	0.045	0.050
e.	Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes.	0.040	0.048	0.055
f.	Igual al d, pero con más piedras.	0.045	0.050	0.060
g.	Tramos lentos, con maleza y pozos profundos.	0.050	0.070	0.080
h.	Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos.	0.075	0.100	0.150
2. Planicies de inundación.				
a.	Pastizales, sin matorrales.			
1.	Pasto corto.	0.025	0.030	0.035
2.	Pasto alto.	0.030	0.035	0.050
b.	Áreas cultivadas.			
1.	Sin cultivo.	0.020	0.030	0.040
2.	Cultivos en línea maduros.	0.025	0.035	0.045

Tipos de canal y descripción		Mínimo	Normal	Máximo
3.	Campos de cultivo maduros.	0.030	0.040	0.050
c.	Matorrales.			
1.	Matorrales dispersos, mucha maleza.	0.035	0.050	0.070
2.	Pocos matorrales y árboles, en invierno.	0.035	0.050	0.060
3.	Pocos matorrales y árboles, en verano.	0.040	0.060	0.080
4.	Matorrales medios a densos, en invierno.	0.045	0.070	0.110
5.	Matorrales medios a densos, en verano.	0.070	0.100	0.160
d.	Árboles.			
1.	Sauces densos, rectos y en verano.	0.110	0.150	0.200
2.	Terreno limpio, con troncos sin retoños.	0.030	0.040	0.050
3.	Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños.	0.050	0.060	0.080
4.	Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas.	0.080	0.100	0.120
5.	Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas.	0.100	0.120	0.160
3.	Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos.			
a.	Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas.	0.030	0.040	0.050
b.	Fondo: cantos rodados con rocas grandes.	0.040	0.050	0.070
B.	Canales revestidos o desarmables.			
1.	Metal.			
a.	Superficie lisa de acero.			
1.	Sin pintar.	0.011	0.012	0.014
2.	Pintada.	0.012	0.013	0.017
b.	Corrugado.	0.021	0.025	0.030
2.	No metal.			
a.	Cemento.			
1.	Superficie pulida.	0.010	0.011	0.013
2.	Mortero.	0.011	0.013	0.015
b.	Madera.			
1.	Cepillada, sin tratar.	0.010	0.012	0.014
2.	Cepillada, creosotada.	0.011	0.012	0.015
3.	Sin cepillar.	0.011	0.013	0.015
4.	Láminas con listones.	0.012	0.015	0.018
5.	Forrada con papel impermeabilizada.	0.010	0.014	0.017
c.	Concreto.			
1.	Terminado con llana metálica (palustre).	0.011	0.013	0.015
2.	Terminado con llana de madera.	0.013	0.015	0.016
3.	Pulido, con gravas en el fondo.	0.015	0.017	0.020
4.	Sin pulir.	0.014	0.017	0.020
5.	Lanzado, sección buena.	0.016	0.019	0.023
6.	Lanzado, sección ondulada.	0.018	0.022	0.025
7.	Sobre roca bien excavada.	0.017	0.020	
8.	Sobre roca irregularmente excavada.	0.022	0.027	
d.	Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de:			
1.	Piedra labrada, en mortero.	0.015	0.017	0.020
2.	Piedra sin seleccionar, sobre mortero.	0.017	0.020	0.024
3.	Mampostería de piedra cementada, recubierta.	0.016	0.020	0.024
4.	Mampostería de piedra cementada.	0.020	0.025	0.030
5.	Piedra suelta o riprap.	0.020	0.030	0.035
e.	Fondo de gravas con lados de:			
1.	Concreto encofrado.	0.017	0.020	0.025
2.	Piedra sin seleccionar, sobre mortero.	0.020	0.023	0.026
6.	Piedra suelta o riprap.	0.023	0.033	0.036
f.	Ladrillo.			
1.	Barnizado o lacado.	0.011	0.013	0.015

Tipos de canal y descripción		Mínimo	Normal	Máximo
	2. En mortero de cemento.	0.012	0.015	0.018
g.	Bloques de piedra labrados.	0.013	0.015	0.017
h.	Asfalto.			
	1. Liso.	0.013	0.013	
	2. Rugoso.	0.016	0.016	
i.	Revestimiento vegetal.	0.030		0.500
C.	Excavado o dragado.			
a.	En tierra, recto y uniforme.			
	1. Limpio, recientemente terminado.	0.016	0.018	0.020
	2. Limpio, después de exposición a la intemperie.	0.018	0.022	0.025
	3. Con gravas, sección uniforme, limpio.	0.022	0.025	0.030
	4. Con pastos cortos, algunas malezas.	0.022	0.027	0.033
b.	En tierra, serpenteante y lento.			
	1. Sin vegetación.	0.023	0.025	0.030
	2. Pastos, algunas malezas.	0.025	0.030	0.033
	3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos.	0.030	0.035	0.040
	4. Fondo en tierra con lados en piedra.	0.028	0.030	0.035
	5. Fondo pedregoso y bancas con malezas.	0.025	0.035	0.040
	6. Fondo en cantos rodados y lados limpios.	0.030	0.040	0.050
c.	Excavado con pala o dragado.			
	1. Sin vegetación.	0.025	0.028	0.033
	2. Matorrales ligeros en las bancas.	0.035	0.050	0.060
d.	Cortes en roca.			
	1. Lisos y uniformes.	0.025	0.035	0.040
	2. Afilados e irregulares.	0.035	0.040	0.050
e.	Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar.			
	1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo.	0.050	0.080	0.120
	2. Fondo limpio, matorrales en los lados.	0.040	0.050	0.080
	3. Igual, nivel máximo de flujo.	0.045	0.070	0.110
	4. Matorrales densos, nivel alto.	0.080	0.100	0.140

Nota. Tomado de Chow, V. Te. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Editorial McGraw-Hill.

Asimismo, Cowan (1956) propone una metodología para determinar el valor de n mediante la siguiente ecuación:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad (2)$$

Donde:

n : Coeficiente de rugosidad a determinar (adimensional).

n_0 : Valor básico del coeficiente de rugosidad para un tramo recto y uniforme.

n_1 : Incremento por irregularidades de las secciones.

n_2 : Incremento por variaciones de forma y dimensiones de las secciones.

n_3 : Incremento por obstrucciones.

n_4 : Incremento por vegetación en el cauce.

m_5 : Factor correctivo por curvas y meandros del río.

1.4. Flujos en canales abiertos

Según Villón (2007) los canales son conductos de circulación del agua por acción de la gravedad y sin intervención de la presión, pues la superficie libre está expuesta a la atmósfera.

La sección transversal de un cauce natural por lo general puede ser de cualquier forma circular hasta irregular, variando de un lugar a otro. Para el caso de canales artificiales, usualmente tienen formas geométricas regulares.

1.4.1. Tipos de flujos en canales abiertos

El flujo en canales abiertos puede clasificarse según varios criterios. Desde el punto de vista de Villón (2007) menciona lo siguiente:

1.4.1.1. Flujo permanente

El flujo es permanente si los parámetros (tirante, velocidad, área hidráulica, etc.), no cambia con respecto al tiempo. Con esto se indica que una sección del canal conserva de manera constante los elementos del flujo independientemente del tiempo.

Se representa por la siguiente expresión matemática:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = 0, \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

Donde

$\frac{\partial \gamma}{\partial t}$: Gradiente del tirante m/s

$\frac{\partial v}{\partial t}$: Gradiente de velocidad m/s²

$\frac{\partial A}{\partial t}$ = Gradiente de área m²/s

1.4.1.2. Flujo no permanente

En el flujo no permanente los parámetros no varían con respecto al tiempo, este flujo es poco frecuente.

Se representa por la siguiente expresión matemática:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial v}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial A}{\partial t} \neq 0 \quad (4)$$

1.4.1.3. Flujo crítico, subcrítico y supercrítico

Este flujo considera los efectos de la gravedad sobre su estado. Las fuerzas de gravedad está relacionada con el número de Froude (Fr).

Se representa por la siguiente expresión matemática:

$$Fr = \frac{v}{v\sqrt{gL}} \quad (5)$$

Donde:

v: velocidad media (m/s)

g: aceleración de la gravedad (m²/s)

L: longitudes características de la sección (m)

La longitud en canales entra en base a la magnitud de la profundidad media o tirante medio $\gamma = \frac{A}{T}$, obteniéndose la siguiente expresión:

$$Fr = \frac{v}{v\sqrt{g\gamma}} = \frac{v}{\sqrt{g\frac{A}{T}}} \quad (6)$$

Donde:

v: velocidad media (m/s)

g: aceleración de la gravedad (m²/s)

y: tirante medio (m)

A: sección transversal del flujo (m²)

T: ancho de la lámina libre (m)

Según el número de Froude, el flujo se subdivide en tres (3) tipos:

Flujo subcrítico: corresponde si **Fr<1**, cuando las fuerzas de gravedad son dominantes, produciendo que la velocidad del flujo sea tranquilo y lento. Este tipo de flujo tiene influencia aguas arribas.

Flujo crítico: corresponde si **Fr=1**, significa que las fuerzas de gravedad e inercia están en equilibrio.

Flujo supercrítico: corresponde si **Fr>1**, en esta situación las fuerzas de inercia son más pronunciadas, generando que el flujo presente gran velocidad. Este flujo tiene influencia aguas abajo.

1.5. Período de retorno

El período de retorno “TR” de ocurrencia de una inundación se entiende como el tiempo promedio en años, en que es igualada o superada una vez cada período de retorno (Mejía, 2006).

Establecer el valor del período de retorno en el diseño de un sistema obedece a criterios relacionados con la vida útil de las estructuras proyectadas.

Otro criterio para escoger el período de retorno es mediante la fijación priori del riesgo de falla R de la estructura. Esto es expresado a partir de la ecuación (Chow et al., 1994).

$$T_r = \frac{1}{1 - (1 - j)^{\frac{1}{N}}} \quad (7)$$

Donde:

T_r: Período de retorno(años).

J: Incertidumbre o probabilidad de falla en la predicción(adimensional).

N: Período de años durante el que se pretende proteger la estructura (años).

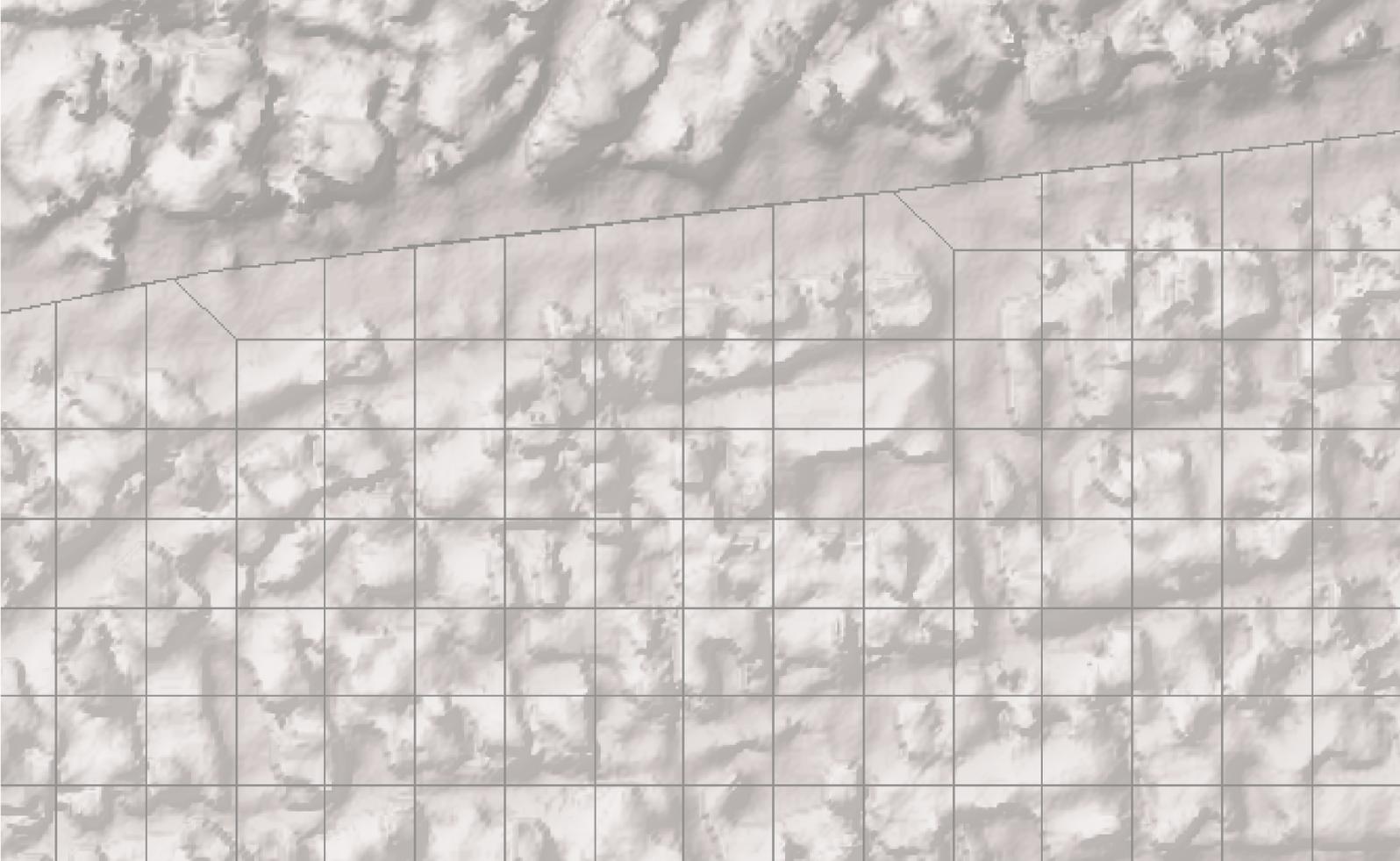
En la tabla 2 se tiene tabulado los períodos de retorno.

Tabla 2

Valores de períodos de retorno de diseño recomendado

Estructura	T(años)
Caudales de Proyecto	
Vertedor de grandes presas	10000
Vertedor de una presa de tierra	1000
Vertedor de una presa de concreto	500
Galería de aguas pluviales	5 a 20
Bocatomas	25 a 75
Pequeñas presas para abastecimiento de agua	50 a 100
Puentes en carreteras importantes	50 a 100
Puentes en carreteras comunes	25
Lluvias de Proyecto	
Pequeños canales sin dique:	
– área rural	5
– área urbana	10
Canales grandes sin dique:	
– área rural	10
– área urbana	25
Pequeños canales con diques:	
– área rural	10
– área urbana	50
Grandes canales con diques:	
– área rural	50
– área urbana	100

Nota. Tomado de Mejía M., J. A. (2006). *Hidrología aplicada*. UNALM.



Capítulo 2

Fundamentos de aplicación del programa

Capítulo 2

Fundamentos de aplicación del programa

2. Fundamentos de aplicación del programa

Asian Disaster Reduction Center (ADRC, 2019) sobre las inundaciones, pueden considerarse como el desastre natural más importante con una ocurrencia mayor que cualquier otro peligro natural y afectando a más personas que todas las demás amenazas naturales juntas. Además, el cambio climático aumentará las probabilidades de inundaciones y su magnitud (Das et al., 2013). Las inundaciones están relacionadas con conflictos socio-civiles (Ghimire et al., 2015), problemas ambientales (Moya Quiroga et al., 2016) y pérdidas económicas (Aerts & Botzen, 2011).

Los Llanos de Moxos ubicados en la Amazonia boliviana son un ejemplo de explanadas aluviales que continuamente sufren graves inundaciones que causan daños ambientales, económicos y sociales. Varias superficies de tierra cultivable se inundaron, miles de cabezas de ganado se ahogaron, así como los cultivos y algunas ciudades importantes quedaron anegadas o bajo sus amenazas. Además, debido a las características topográficas planas de la zona, las inundaciones duran varios días, por lo tanto, las personas también están expuestas a enfermedades transmitidas por el agua y por vectores.

2.1. Aplicaciones del programa

De acuerdo con Villón (2014), el modelo de simulación hidráulica HEC-RAS, permite las acciones como las siguientes:

- Pronosticar eventos hidrometeorológicos de inundación.
- Determinar variables hidráulicas para modelar estructuras, tales como, diques, alcantarillas, pilares de puentes, compuertas, entre otros.
- Demarcación de las fajas marginales de los cauces de agua.

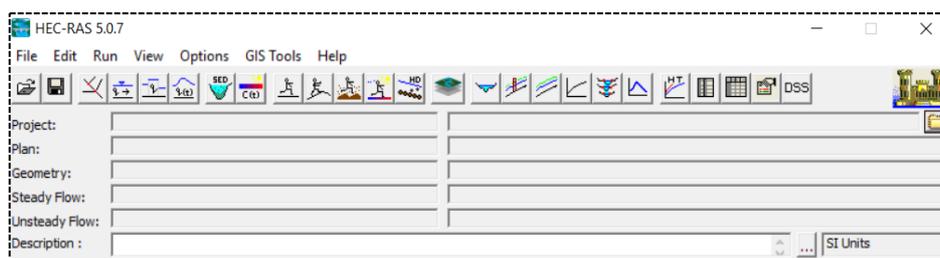
2.2. Características generales del programa y aplicación en un modelamiento

2.2.1. Pantalla Principal de HEC - RAS

Al iniciar el programa, aparecerá la ventana principal que contendrá barra de menú (carpeta, editar, correr programa, Ver, Opciones, Herramientas GIS y Ayuda) y la barra de herramientas, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Ventana Principal HEC-RAS



Dentro de la barra de las herramientas tendremos opciones que se explicarán a continuación, en la Tabla 3.

Tabla 3

Herramientas del Programa HEC-RAS

Icono	Descripción
	Abrir Proyecto: Esta opción, como su nombre lo indica, permite abrir un proyecto anteriormente creado.
	Guardar proyecto: Esta opción, permite guardar el proyecto que se está desarrollando en ese momento, si no se ha guardado anteriormente, nos permite elegir un nombre.
	Geometría: Esta opción, permite crear, exportar, editar o simplemente ver una geometría
	Datos de flujo constante: Esta opción, permite ingresar y editar uno o más perfiles de flujo constante en función de sus condiciones de frontera.
	Datos de flujo cuasi-inestable: Esta opción, permite ingresar y editar uno o más perfiles de flujo cuasi-inestable en función de sus condiciones de frontera.
	Datos de flujo inestable: Esta opción, permite ingresar y editar uno o más perfiles de flujo inestable en función de sus condiciones de frontera.
	Condiciones de borde de los sedimentos: Esta opción, permite ingresar y editar una o más curvas granulométricas.
	Datos de la calidad del agua: Esta opción, permite ver y editar datos sobre la calidad del agua del canal.
	Análisis de flujo constante: Esta opción, permite realizar un análisis con datos ingresados de un flujo constante.
	Análisis de flujo inestable: Esta opción, permite realizar un análisis con datos ingresados de un flujo inestable.
	Análisis de transporte de sedimentos: Esta opción, permite realizar un análisis con datos ingresados de los sedimentos del canal o río.
	Análisis de calidad de agua: Esta opción, permite realizar un análisis con datos de calidad del agua del canal o río.
	Cálculos de diseño hidráulico: Esta opción, permite realizar cálculos de diseño hidráulico del canal o río.
	RAS Mapper: Esta opción, permite visualizar resultados de análisis en un mapa, para mejor interpretación.

Icono	Descripción
	Secciones transversales: Esta opción, permite visualizar cada una de las secciones después del análisis.
	Perfiles: Esta opción, permite visualizar cada uno de los perfiles anteriormente analizados.
	Vista general del perfil: Esta opción, permite consultar las características hidráulicas del río o canal.
	Curvas de medición calculadas: Esta opción, permite ver y copiar las curvas de medición calculadas.
	Vista 3D: Esta opción, permite visualizar el río o canal desde distintos ángulos, girándolo a conveniencia.
	Hidrogramas: Esta opción, permite visualizar los hidrogramas referentes al resultado de los análisis.
	Propiedades hidráulicas: Esta opción, permite visualizar las propiedades hidráulicas del río o canal mediante gráficos.
	Tabla de detalles de salida de las secciones: Esta opción, permite visualizar la tabla de datos de salidas en una sección o en una estructura hidráulica.
	Tabla de resumen de los resultados: Esta opción, permite visualizar la tabla de resumen en la que se encuentran los resultados de cada sección y con cada perfil con que se ha analizado.
	Resumen de errores, advertencias y notas: Esta opción, permite ver todos los avisos de ayuda para un correcto análisis.
	Sistema de almacenamiento de datos: Esta opción, permite visualizar la salida del flujo inestable.

Nota. Instituto Científico del Pacífico

2.3. Desarrollo de un modelamiento hidráulico con HEC - RAS

Para el desarrollo de un proyecto únicamente usando el software HEC-RAS se realizará mediante el siguiente procedimiento:

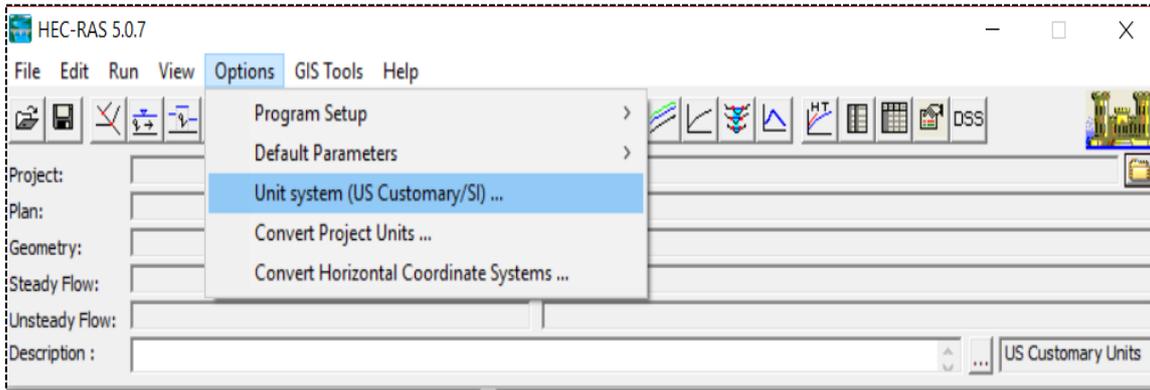
1. Establecer el sistema de unidades.
2. Crear un proyecto nuevo.
3. Introducir datos geométricos.
4. Introducir los datos caudales y las condiciones de contorno.
5. Iniciar la simulación
6. Visualización e interpretación de los resultados

2.3.1. Definir el sistema de unidades del proyecto

Antes de iniciar con proyectos es necesario establecer el sistema de unidades en el que desea trabajar, los sistemas que se tiene son el sistema internacional (métrico) y el inglés.

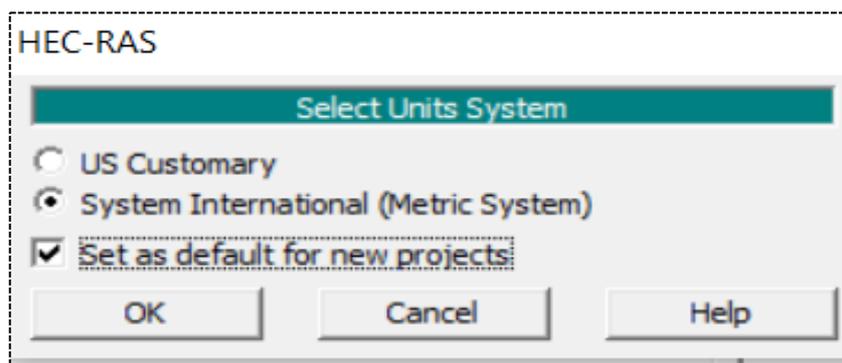
- Al iniciar el programa se tiene predeterminado el sistema de **unidades US**. Para configurar al sistema que se desea trabajar nos vamos a **Options/ Unit System** (US Customary/SI), como se muestra en la Figura 3.

Figura 3
Sistema de Unidades



- Luego se mostrará la ventana de la Figura 4:
 - **Us customary**, para elegir el sistema inglés.
 - **System International (Metric System)**, para elegir el sistema métrico.
 - **Set as default for new projects**, la opción para que se conserve estas unidades para todos los proyectos.

Figura 4
Ventana de selección de sistema de unidades



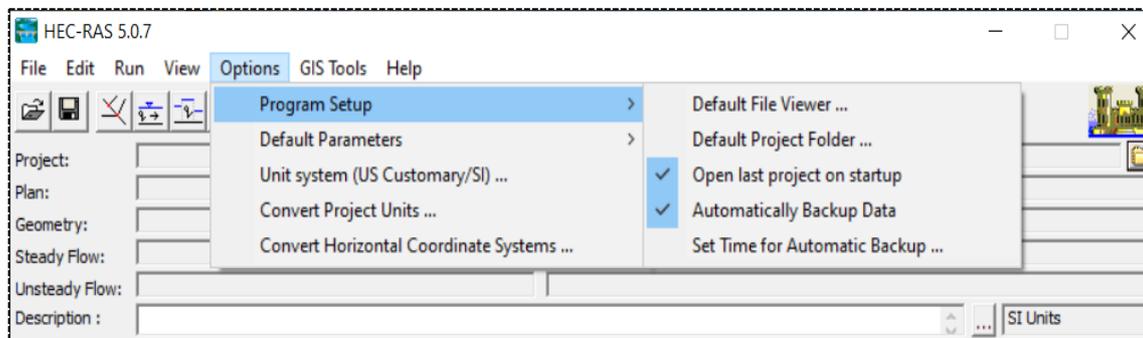
Adicionalmente se configura dos (2) opciones necesarias, que se muestran en la Figura 5.

- El primero ejecuta en **Options/ Program Setup/ activamos Open Last Proyecto On Startup** que permitirán abrir automáticamente el último proyecto que se estuvo elaborando.

- El siguiente, es activar **Automatically Backup Data** que indica que automáticamente guardará el proyecto en un intervalo de tiempo que se establezca, esto se configura haciendo clic en **Set Time for Automatic Backup**.

Figura 5

Configuraciones adicionales del programa



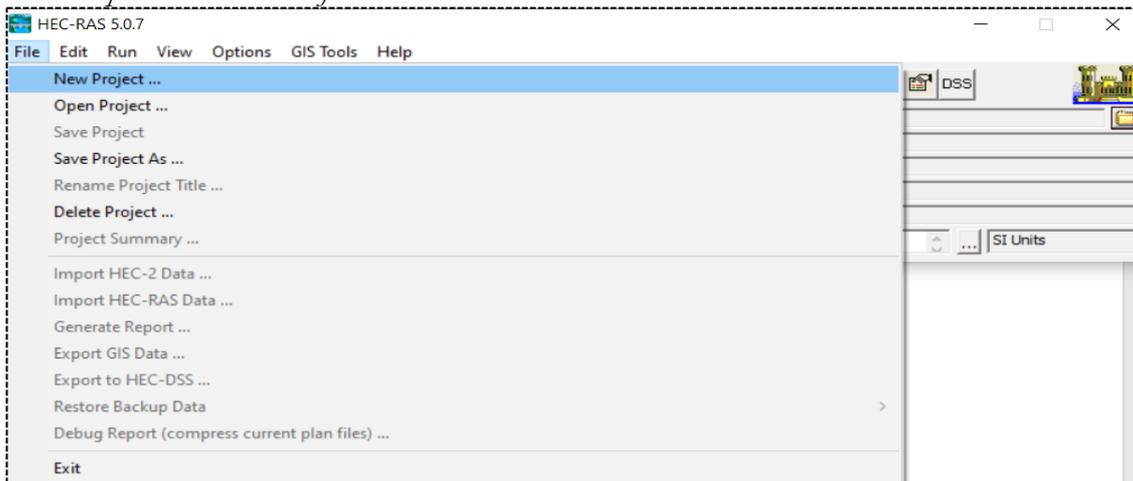
2.3.2. Crear un nuevo proyecto

Una vez definido las unidades adecuadas se prosigue en crear el proyecto; es importante señalar que el programa crea varios directorios por separado (geometría, plan, proyecto simulación y perfiles de flujos), de modo que es imprescindible crear una carpeta principal de trabajo con el nombre del proyecto donde se anexará de manera ordenada todos los archivos que se generarán durante el proceso del modelamiento.

- Se inicia dirigiéndose al menú principal y desde el menú de **File** se selecciona **New Project**, que se muestra en la Figura 6.

Figura 6

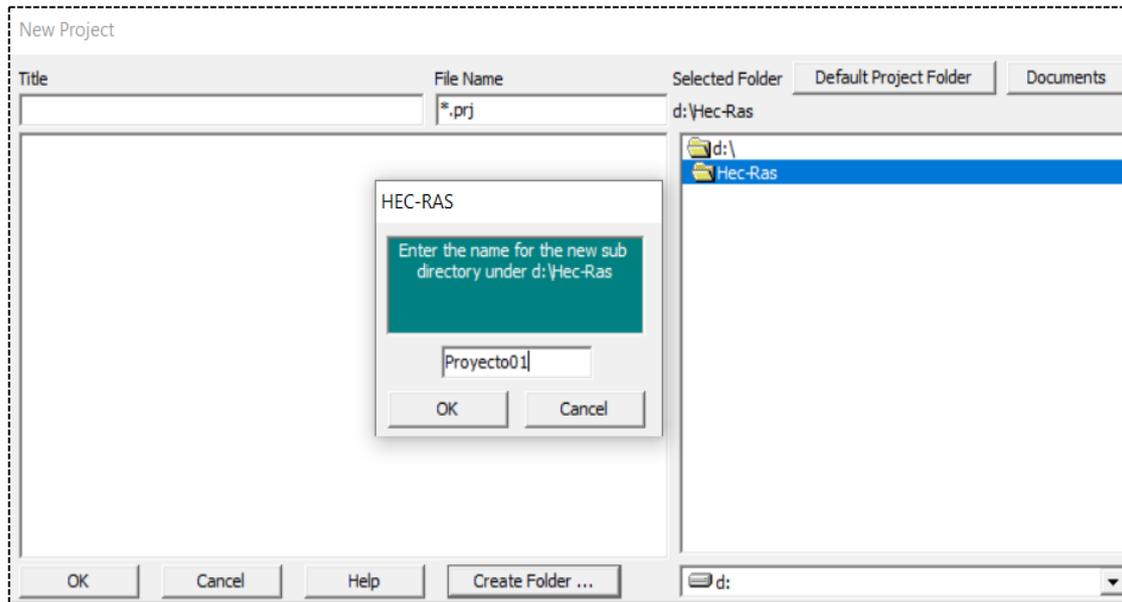
Ventana para crear New Project



- Se abre la ventana “New Project”, en ella se realizarán los siguientes pasos:

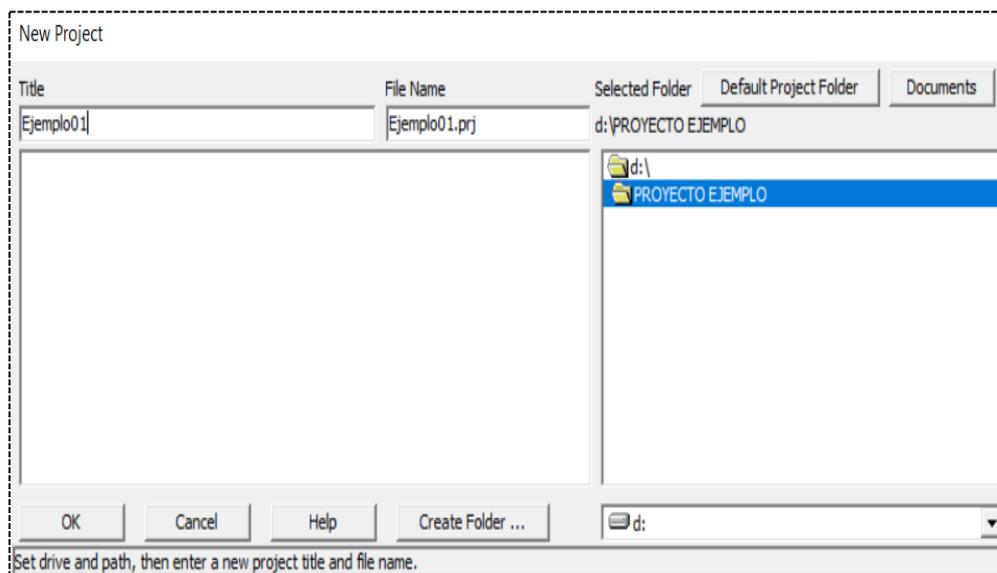
- a) Se crea una carpeta en la cual se guardará el proyecto, haciendo clic en **Create Folder** y mostrará una nueva ventana, como se señala en la Figura 7, en la que indica colocar un nombre a la carpeta, por ejemplo: **Proyecto01**.

Figura 7
Ventana New Project



- b) A continuación, se coloca en **Title** el título del proyecto y en **File Name** se coloca un título opcional, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8
Ventana para asignar el nombre del archivo

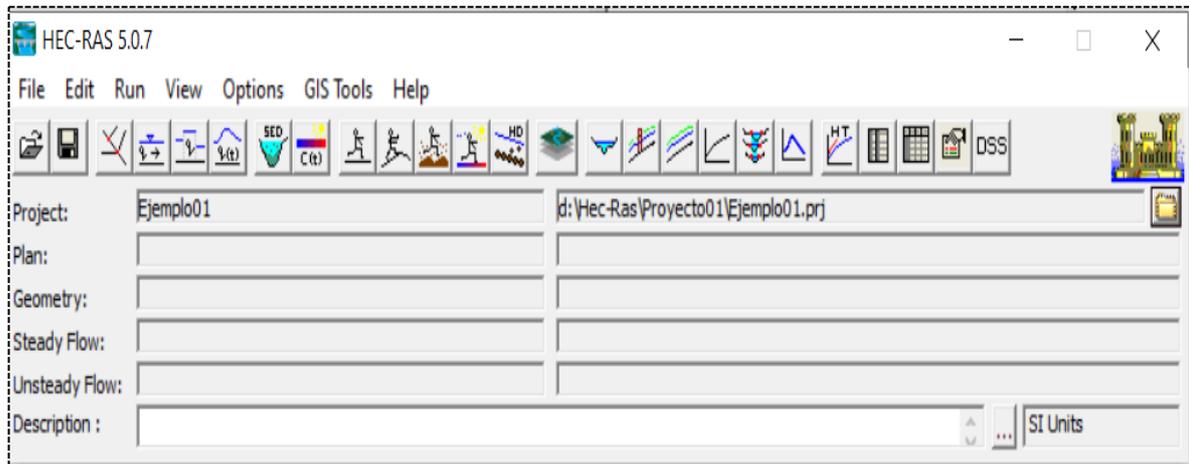


- a) Finalmente, se pulsa **ok**, aparecerá una nueva ventana, en ella indica el título del proyecto, el directorio donde se guardará y el sistema de unidades que tiene el

proyecto. En la pantalla principal aparece en el ítem **Project** con extensión. **prj.**, el título del proyecto y la ubicación del archivo, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Ventana con el proyecto creado



2.3.3. Caracterización de la geometría

Una herramienta importante es **Geometry Data**, en el cual se introduce los datos geométricos, que permite realizarse de dos (2) maneras:

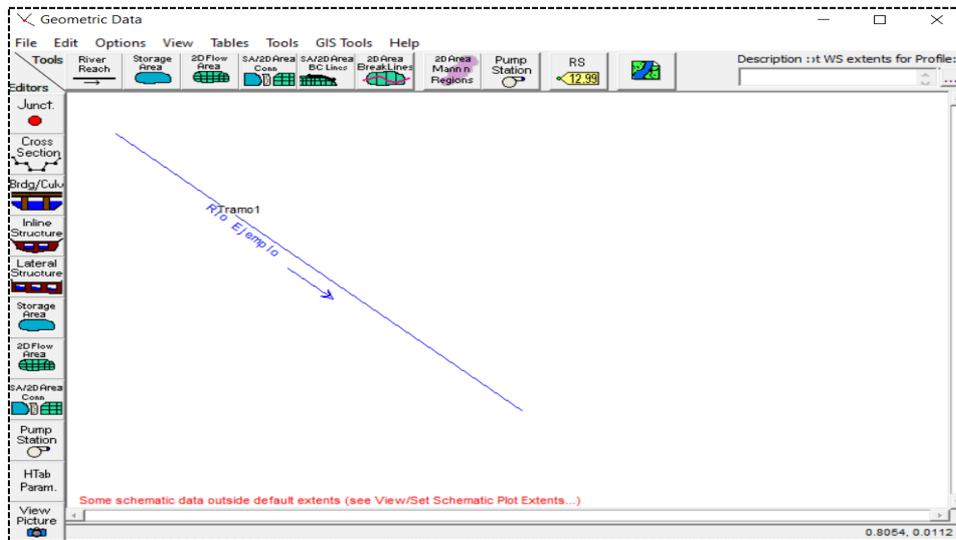
- Trazar el esquema del río empleando **River Reach**.
- Importar los datos preliminarmente trabajados en programa AUTOCAD o CIVIL 3D.

2.3.3.1. Definición del esquema del río

En el menú, se selecciona **Geometry data**, luego aparecerá la ventana de datos geométricos, donde se definirá el curso del río, para lo cual se hace clic en **River Reach**, generando la aparición de un lápiz, mediante el cual se traza considerando que el sentido del dibujo debe ser de AGUAS ARRIBA hacia AGUAS ABAJO, al finalizar el dibujo, pide el nombre del río y el nombre del tramo de estudio, por ejemplo "**Ejemplo1**" y el tramo "**tramo 1**" como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Ventana de datos geométricos



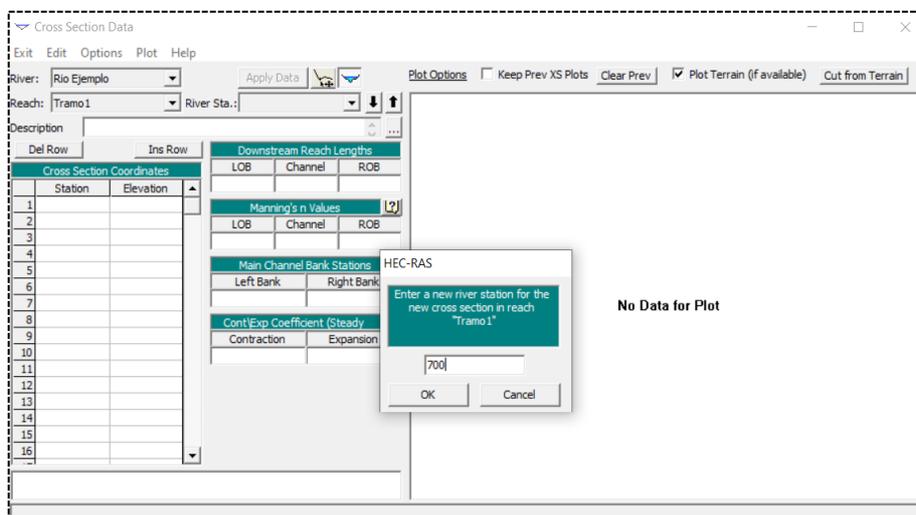
2.3.3.2. Introducir datos de las secciones transversales

Se establece el eje del río o canal, para luego modelar la geometría del río utilizando **Cross Section**.

- ♦ Se empieza a editar en la ventana **Cross Section Data**, haciendo clic en la barra superior en **Options/ Add a new Cross Section**, luego solicitará indicar el orden de las secciones transversales, el cual debe ser de manera numérica señalando que los números mayores corresponden aguas arriba y los números menores aguas abajo. En esta parte se coloca las secciones transversales, en este caso “700” como se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Ventana de secciones transversales



- ◆ En la columna **Cross Section Coordinates** (coordenadas de la sección transversal), se introduce los puntos de coordenadas para formar el río. En la columna denominada **Station** (estaciones) se colocará las coordenadas horizontales (eje X) y en la columna **Elevation** (cotas) las cotas del terreno (eje Y) como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Aplicación de coordenadas correspondientes a las secciones

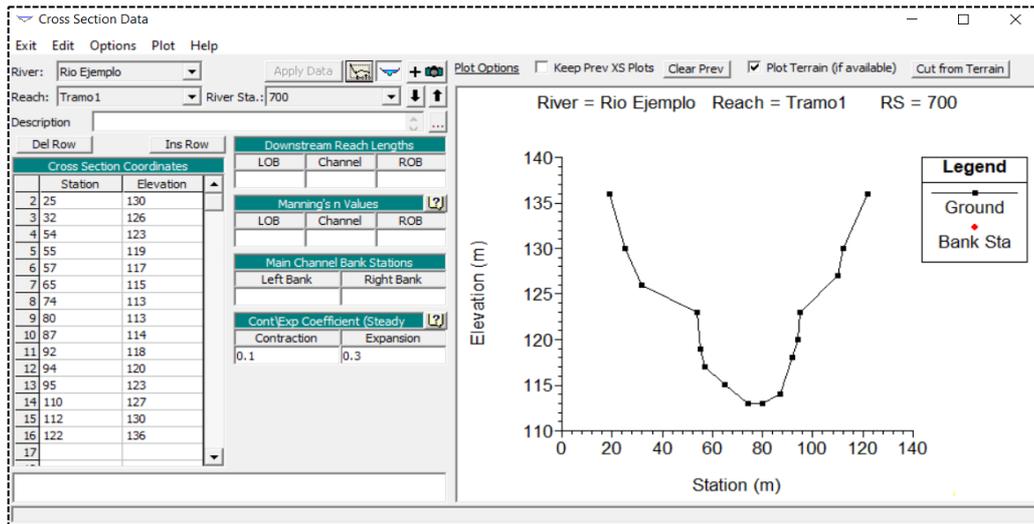
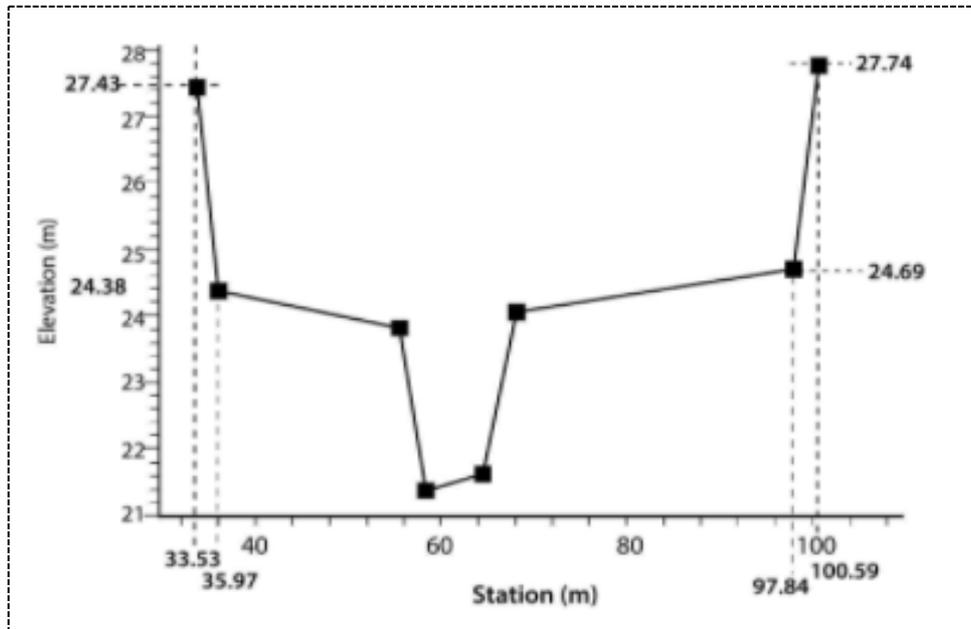


Figura 13

Representación de coordenadas de la sección transversal



Nota. Villón Béjar, M. (2014). *HEC-RAS: Ejemplos*. Editorial Tecnológica Costa Rica. Para crear más secciones se realiza desde **Options/ Add a new cross section**.

2.3.3.3. Introducir datos de separación de la sección aguas abajo

En la tabla **Downstream Reach Lengths** se coloca la distancia de separación entre la sección actual y la siguiente aguas abajo: LOB (distancia entre las márgenes izquierdas), CHANNEL (distancia a lo largo del centro del cauce) y ROB (distancia entre las márgenes derechas) como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Ventana Downstream Reach Lengths

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
150	150	150

Figura 15

Representación gráfica de separación entre las secciones



Nota. Villón Béjar, M. (2014). *HEC-RAS: Ejemplos*. Editorial Tecnológica Costa Rica.
La distancia en las márgenes puede variar de acuerdo a la trayectoria del cauce.

2.3.3.4. Introducir el coeficiente de rugosidad de Manning

En **Manning's Values** se inicia con el valor del coeficiente de rugosidad de Manning (n), considerando que el valor no es constante debido a que los márgenes laterales presentan la cobertura vegetal distintas al cauce central. En base a ello, se tienen el LOB (margen izquierdo), CHANNEL (cauce) y, ROB (margen derecho) como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Ventana Manning's n Values

Manning's n Values		
LOB	Channel	ROB
0.05	0.04	0.05

Nota. El programa cuenta con un manual de ayuda que se recurre haciendo clic en el icono **Display information table for Manning's (?)**.

Figura 17

Representación gráfica de los coeficientes de rugosidad de Manning



2.3.3.5. Introducir los datos de los bancos

En la tabla **Main Channel Bank Stations** se definen los puntos de la sección principal del cauce. El resto de la sección, se considera área de inundación como se muestra en la Figura 18.

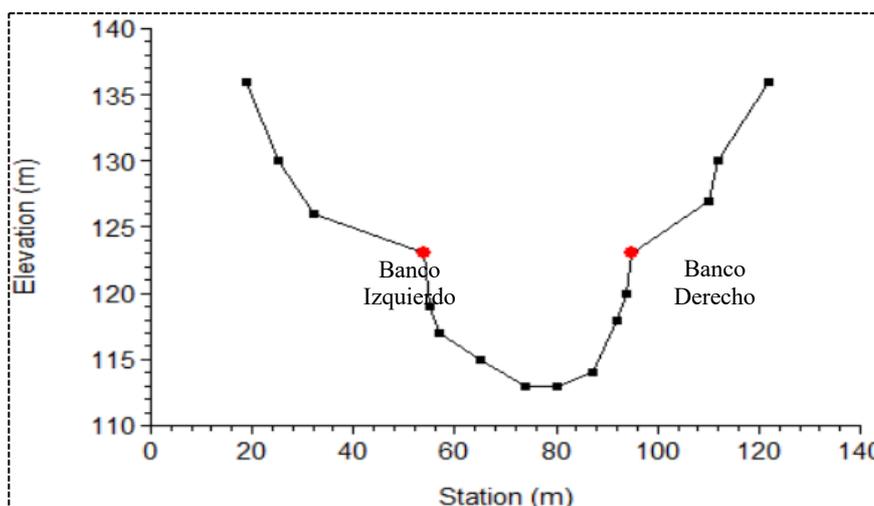
Figura 18

Ventana Channel Bank Stations

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
54	95

Figura 19

Representación gráfica de datos de los bancos



2.3.3.6. Introducir datos de los coeficientes de contracción y expansión

En **Cont/Exp Coefficient (Steady Flow)** se introduce los coeficientes de contracción/expansión que determina la pérdida de energía entre secciones adyacentes. El programa de manera predeterminada coloca el valor del coeficiente de contracción 0.1 y el valor de coeficiente de expansión 0.3, el cual indica una transición gradual como se muestra en la Figura 20.

Figura 20

Ventana Cont/Exp Coefficient (Steady Flow)



Nota. El programa cuenta con un manual de referencia hidráulica en el icono(?).

En la tabla 4 se detalla algunos coeficientes de contracción y expansión:

Tabla 4

Coefficiente de contracción y expansión

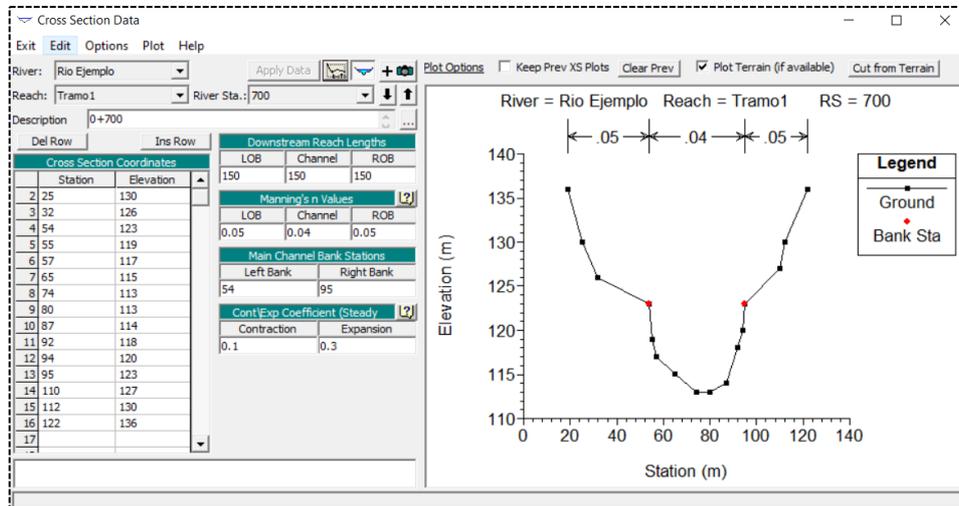
Descripción de la transición	Coefficiente de contracción	Coefficiente de expansión
Perdida sin transición	0	0
Transición gradual	0.1	0.3
Sección típica de puentes	0.3	0.5
Transiciones abruptas	0.6	0.8

Nota. Tomado de Brunner, G., & Ceiw-Hec. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: User Manual 1D and 2D Version 5.0 (5.0)*. US Army Corps of Engineers. www.hec.usace.army.mil

Por último, se hace clic en **Apply Data** para visualizar el esquema de la sección transversal como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Datos para una sección transversal



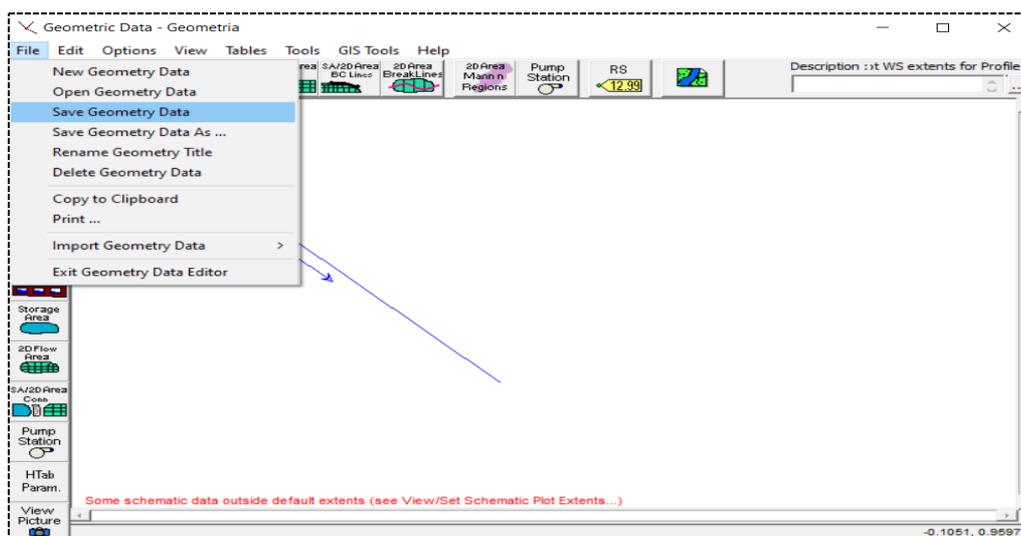
Nota. En el campo **Descripción** se puede realizar una descripción acerca de la sección.

2.3.3.7. Guardar los datos geométricos

Al terminar este proceso es importante guardar este fichero en la carpeta principal del Proyecto. Luego, desde la ventana **Geometric data**, se selecciona **File/ Save Geometric Data** y finalmente se le asigna un nombre al fichero, como se muestra en la Figura 22.

Figura 22

Ventana para guardar los datos geométricos



2.3.4. Caudales y condiciones de contorno de flujo permanente

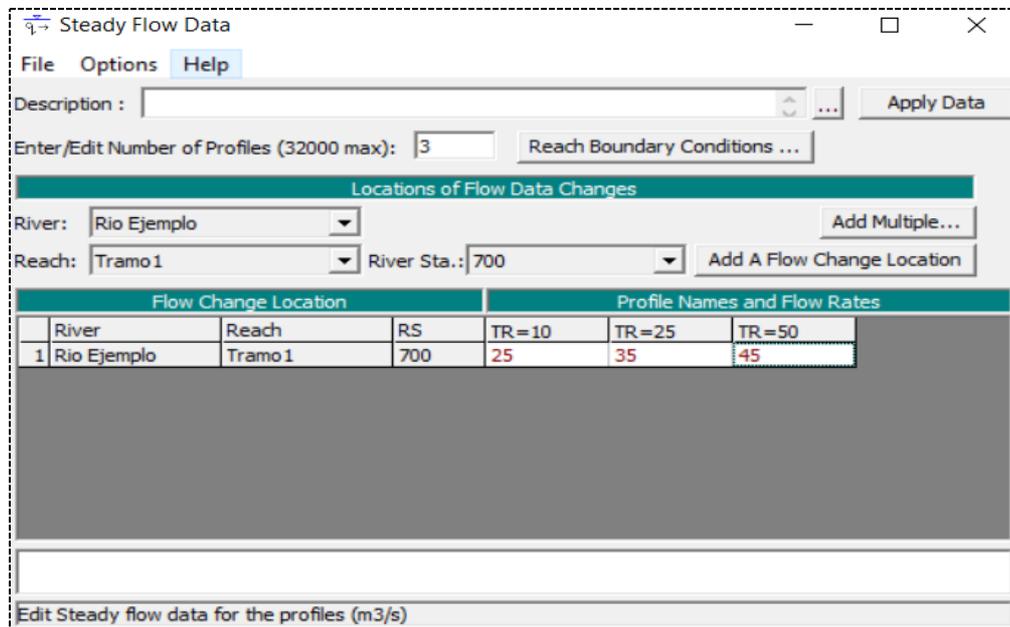
En la ventana principal del programa hacer clic en el icono **View/ Edit steady Flow data** y aparece la ventana **Steady Flow Data**.

2.3.4.1. Introducir datos del caudal

Primero se define el número de columnas para los caudales en la opción **Enter/ Edit number of profiles**. Para editar el nombre de los perfiles se realiza en **Options/ Edit profile Names**, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23

Ventana para ingreso de caudales

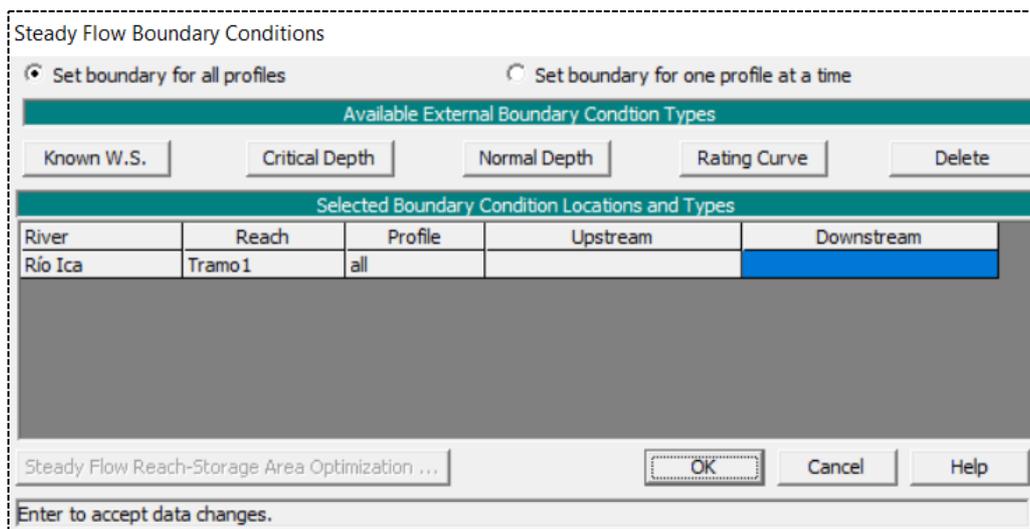


2.3.4.2. Introducir las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definen los niveles de agua inicial en ambos extremos del tramo del río, aguas arriba (upstream) y abajo (Downstream). Se accede ejecutando la opción **Reach Boundary Conditions**, como se muestra en la Figura 24.

Figura 24

Ventana de condiciones de contorno



- **Set boundary for all profiles:** indica que las condiciones de contorno se establecen para todos los caudales a la vez. Generando que los perfiles tengan las mismas condiciones de contorno.
- **Set boundary for one profile at a time:** indica que las condiciones de contorno se establecen para cada caudal.

Los tipos de condiciones de contorno son las siguientes:

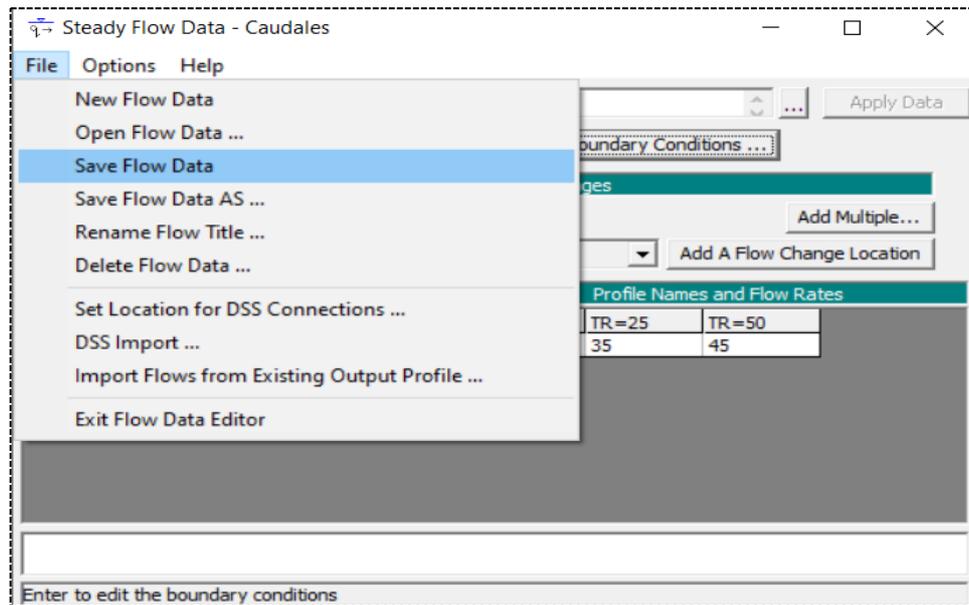
- **Known W.S.** (nivel de agua conocido): se aplica cuando se conoce el nivel de agua en alguna sección transversal. Cabe destacar que esta condición necesita introducir el tirante más la cota más baja de la sección.
- **Critical Depth** (calado crítico): se aplica si existe una sección de control. Mediante ella se calcula la profundidad crítica para todos los perfiles, esta opción no requiere de datos adicionales.
- **Normal Depth** (tirante normal): se aplica cuando el flujo se aproxima al uniforme, además se debe introducir la pendiente del tramo de influencia.
- **Rating Curve** (curva de calado): se aplica si existe alguna sección de control que relaciona el tirante y el caudal.

2.3.5. Guardar los datos de caudales y condiciones de contorno

Nuevamente es necesario guardar el fichero dirigiéndose a **File/ Save Flow Data** y se le asignará un nombre, como se muestra en la Figura 25.

Figura 25

Ventana para guardar los datos de caudales y condiciones de contorno

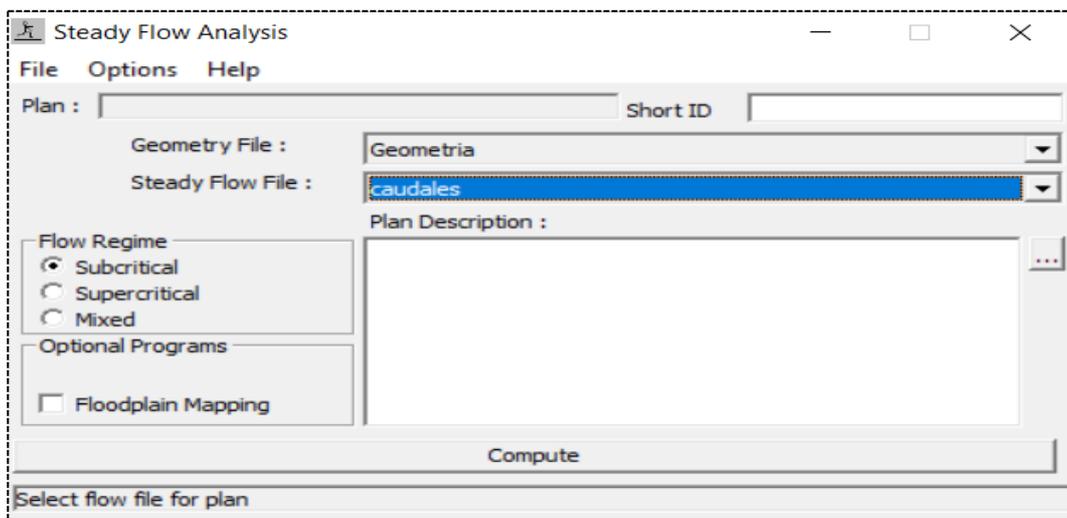


2.3.6. Plan para flujo permanente y ejecutar el modelamiento

La simulación hidráulica se realiza creando un plan para flujo permanente que incorpore los siguientes datos de cálculos: la geometría (tramos y secciones), hidráulicos (caudales) y tipo de régimen. Para ejecutar se selecciona desde el menú principal la herramienta **Perform a Steady flow Simulation**, luego aparece la siguiente ventana, como se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Ventana para crear el plan y ejecutar el modelo

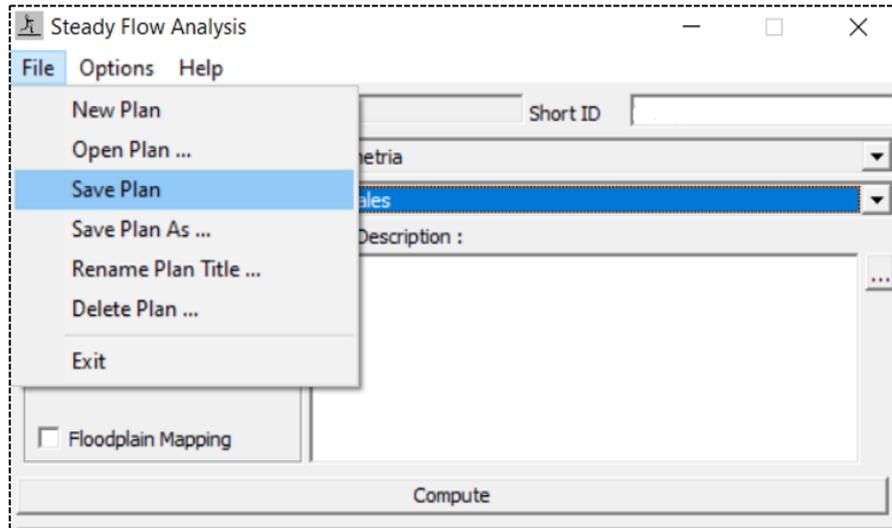


2.3.6.1. Crear plan

Antes de realizar alguna acción es recomendable primero guardar el plan, caso contrario, el programa lo guardará de manera automática dándole el nombre de **Plan 01**, para lo cual se va a **File/ Save Plan** y por último se le asigna el nombre, como se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Ventana para crear el plan

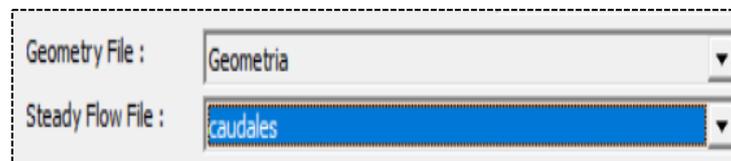


2.3.6.2. Archivos de geometría y caudal

De manera predeterminada aparece la geometría y el caudal. En caso que hubiera varios archivos de geometría y caudales, se puede elegir uno de ellos, como se muestra en la Figura 28.

Figura 28

Ventana de geometría y caudales

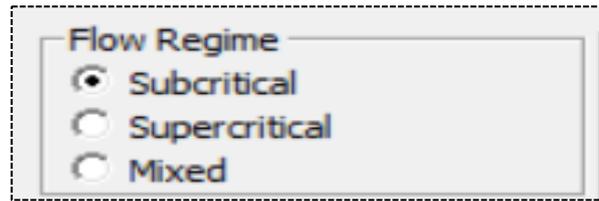


2.3.6.3. Tipo de régimen

La elección del tipo de régimen depende de las condiciones de contorno. En caso de no estar seguro, lo recomendable es elegir la opción **Mixed**, como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Ventana elección del tipo de régimen

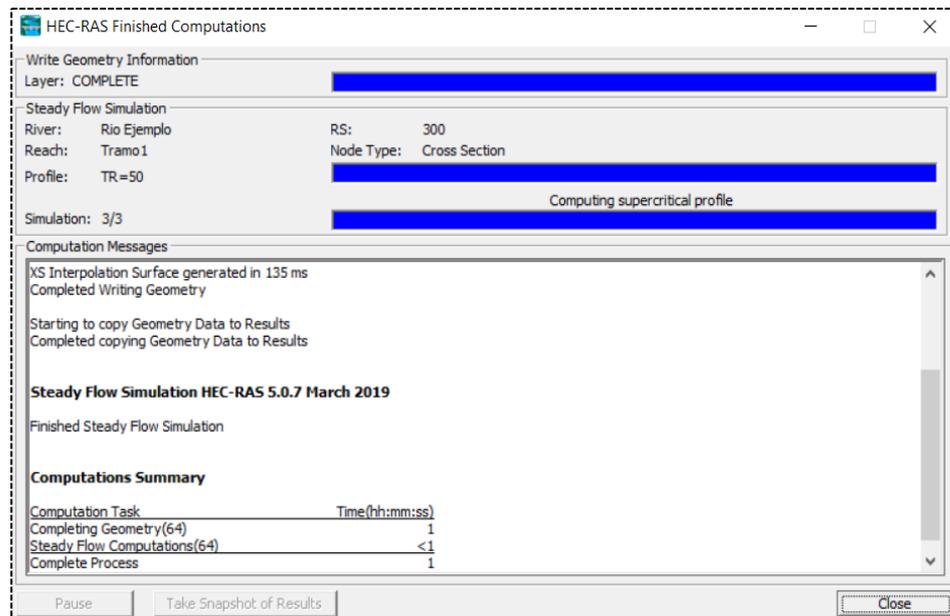


2.3.6.4. Ejecutar la simulación

La simulación se ejecuta desde la opción **Compute** iniciándose el proceso del cálculo, como se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Ventana con la ejecución de la simulación



2.3.7. Visualizar los resultados

Los resultados se visualizarán de diversas maneras. En el menú principal se encuentran los iconos para observar los resultados, como se muestra en la Figura 31.

Figura 31

Ventana visualización de los resultados

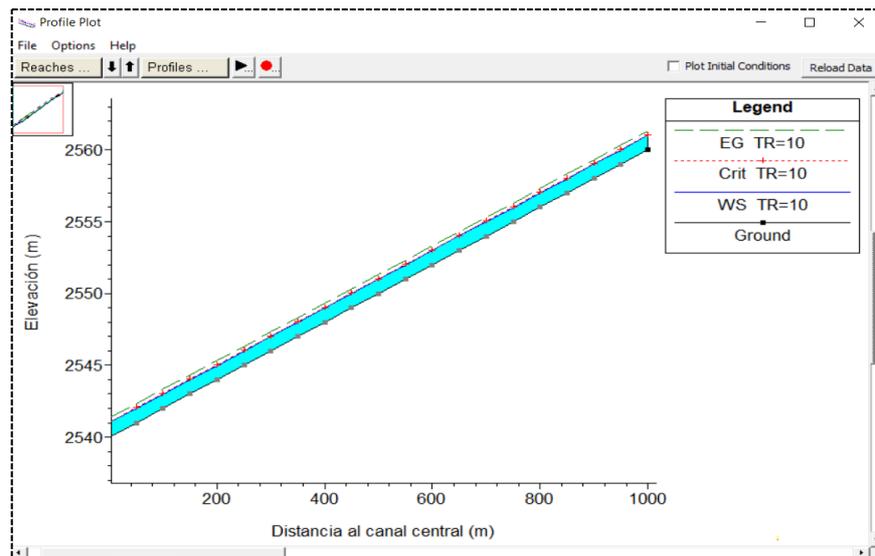


2.3.7.1. Gráfico del perfil longitudinal

Mediante el icono se visualizará los perfiles longitudinales de las láminas de agua del tramo de estudio, es posible elegir y personalizar los tipos de variables que se requiera representarlos en el gráfico. Se realiza haciendo clic en **View Profile**, como se muestra en la Figura 32.

Figura 32

Gráfico del perfil longitudinal

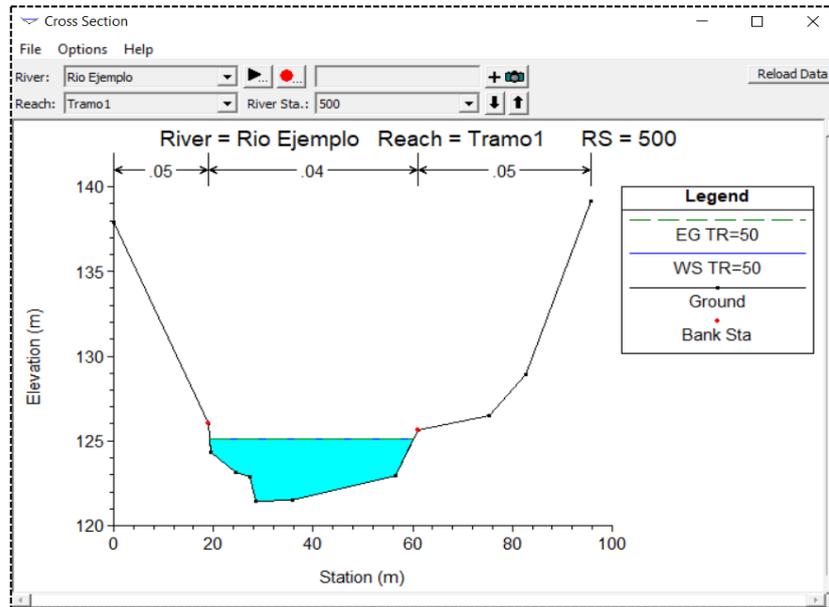


2.3.7.2. Gráfico de las secciones transversales

En estos gráficos, se observará el nivel de agua en cada sección para cada caudal simulado. Se accede desde el menú principal seleccionado el icono **View Cross Section**. Desde el menú **Option** se podrá personalizar las variables que se mostrarán, como también, cambiar los colores y símbolos, como se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Gráfico de las secciones transversales

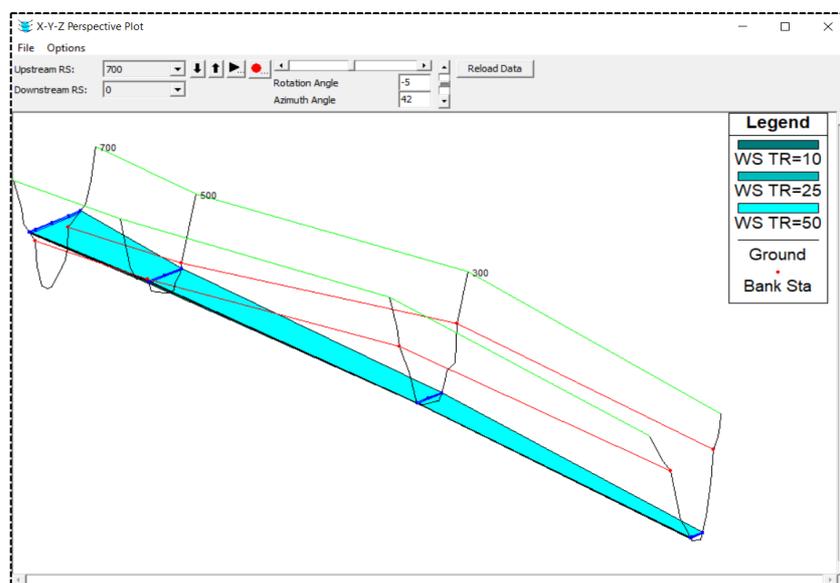


2.3.7.3. Perspectivas 3D

Esta perspectiva muestra una vista 3D de la simulación en el cual se observa cada sección del río y los caudales que transcurren sobre ellos. Se accede desde el menú principal en la opción **View 3D multiple cross section plot**. Como se ha indicado anteriormente, se puede configurar las variables y observar el comportamiento del flujo de acuerdo a los períodos de retorno como se muestra en la Figura 34.

Figura 34

Perspectiva 3D



2.3.7.4. Tablas de las secciones transversales

Las tablas proporcionan información detallada para cada una de las secciones y para cada caudal. Se ejecuta desde el menú principal **Cross Section Output**, como se muestra en la Figura 35.

Figura 35

Salida detallada de la sección transversal

Plan: ejemplo Rio Ejemplo Tramo1 RS: 700 Profile: TR=10					
Element	Left OB	Channel	Right OB		
E.G. Elev (m)	124.75				
Vel Head (m)	0.00				
W.S. Elev (m)	124.75				
Crit W.S. (m)	113.90				
E.G. Slope (m/m)	0.000000				
Q Total (m3/s)	25.00				
Top Width (m)	60.43				
Vel Total (m/s)	0.06				
Max Chl Dpth (m)	11.75				
Conv. Total (m3/s)	39023.6				
Length Wtd. (m)	150.00				
Min Ch El (m)	113.00				
Alpha	1.06				
Frctn Loss (m)	0.00				
C & E Loss (m)	0.00				
Element					
Wt. n-Val.	0.050	0.040	0.050		
Reach Len. (m)	150.00	150.00	150.00		
Flow Area (m2)	11.27	391.87	5.76		
Area (m2)	11.27	391.87	5.76		
Flow (m3/s)	0.13	24.80	0.07		
Top Width (m)	12.86	41.00	6.57		
Avg. Vel. (m/s)	0.01	0.06	0.01		
Hydr. Depth (m)	0.88	9.56	0.88		
Conv. (m3/s)	205.1	38715.3	103.2		
Wetted Per. (m)	12.97	49.88	6.80		
Shear (N/m2)	0.00	0.03	0.00		
Stream Power (N/m s)	0.00	0.00	0.00		
Cum Volume (1000 m3)	0.85	60.91	0.43		
Cum SA (1000 m2)	0.96	25.87	0.49		

Donde:

- E.G.Elev : altura de energía (m).
- W.S.Elev : altura de la lámina de agua (m).
- E.G.Slope : pendiente de la línea de energía.
- Q Total : caudal total en la sección (m³/s).
- Top Width: ancho de la superficie libre del flujo en la sección (m).

2.3.7.5. Tablas simplificadas para los perfiles

Estas tablas brindan información resumida de todos los perfiles. Se obtiene seleccionado en el menú la opción **View summary output tables by profile**, como se muestra en la Figura 36.

Figura 36

Tabla de resumen de perfiles

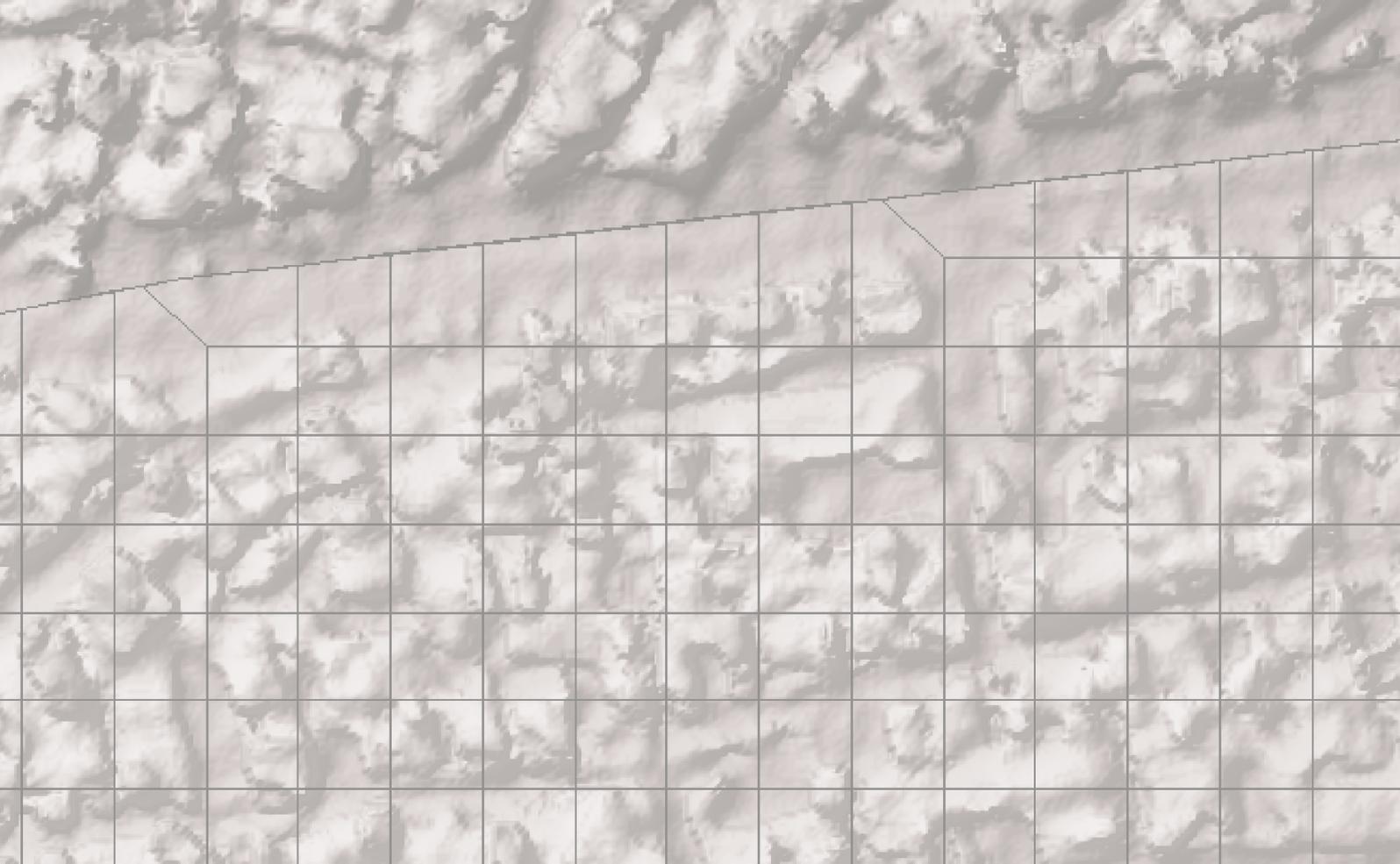
HEC-RAS Plan: ejemplo River: Rio Ejemplo Reach: Tramo1												Reload Data
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Tramo1	700	TR=10	25.00	113.00	124.75	113.90	124.75	0.000000	0.06	408.90	60.43	0.01
Tramo1	700	TR=25	35.00	113.00	124.96	114.07	124.96	0.000001	0.09	421.53	62.70	0.01
Tramo1	700	TR=50	45.00	113.00	125.14	114.22	125.14	0.000001	0.11	433.26	64.74	0.01
Tramo1	500	TR=10	25.00	121.45	124.75		124.75	0.000041	0.27	92.01	40.11	0.06
Tramo1	500	TR=25	35.00	121.45	124.95		124.96	0.000062	0.35	100.17	40.50	0.07
Tramo1	500	TR=50	45.00	121.45	125.13		125.14	0.000082	0.42	107.55	40.86	0.08
Tramo1	300	TR=10	25.00	123.45	124.61		124.70	0.004615	1.28	19.48	29.36	0.50
Tramo1	300	TR=25	35.00	123.45	124.77		124.88	0.004567	1.44	24.28	30.44	0.52
Tramo1	300	TR=50	45.00	123.45	124.91		125.04	0.004462	1.57	28.66	30.99	0.52
Tramo1	0	TR=10	25.00	120.41	121.45	121.45	121.79	0.018557	2.58	9.68	14.25	1.00
Tramo1	0	TR=25	35.00	120.41	121.63	121.63	122.05	0.017508	2.84	12.32	14.97	1.00
Tramo1	0	TR=50	45.00	120.41	121.79	121.79	122.27	0.017106	3.07	14.68	15.59	1.01

Total flow in cross section.

Donde:

- Q Total : caudal total por perfiles (m³/s).
- Min Ch El : cota inferior del cauce en la sección (m).
- W.S.Elev : altura de la lámina de agua (m).
- Crit W.S. : cota del calado crítico (m).
- E.G.Elev : altura de energía (m).
- E.G.Slope: pendiente de la línea de energía.
- Vel Chnl : velocidad del agua en el cauce (m/s).
- Flow Area : superficie mojada en la sección (m²).
- Top Width : ancho de la superficie libre del flujo en la sección (m).
- Froude # Chl: número de Froude .

Nota: Los resultados se pueden exportar a Excel. Para exportar se pulsa clic en file/ copy to clip luego se abre Excel y pegar.



Capítulo 3

Desarrollo del modelo hidráulico

Capítulo 3

Desarrollo del modelo hidráulico

El cambio climático y el aumento de la actividad humana han provocado alteraciones generalizadas en los regímenes de caudal (por ejemplo, caudales ambientales) necesarios para satisfacer las necesidades socioeconómicas y la salud ecológica a nivel mundial (Poff, 2018).

Ahora bien, las recomendaciones de caudales ambientales generalmente se enfocan en su manejo para promover la salud ecológica dado que el caudal se ha citado como una variable maestra que gobierna muchos aspectos de la hidrología, la calidad del agua y el hábitat físico disponible (*un indicador de la salud ecológica*) (Zeiger & Hubbart, 2021).

Zeiger & Hubbart (2021) sobre el desarrollo hidráulico explican que la simulación de flujos inestables 2D en respuesta a la entrada del modelo de lluvia en la red fue el avance más reciente de HEC-RAS en el momento de este estudio. La variabilidad longitudinal y lateral de la profundidad y velocidad del agua en llanuras de inundación y entornos de canales, se puede cuantificar utilizando simulaciones de lluvia en la red HEC-RAS 2D.

Esta información sobre el hábitat físico es importante para el análisis de los caudales ambientales, sin embargo, dado que HEC-RAS no tiene en cuenta la infiltración del suelo y otras pérdidas, la precipitación debe introducirse como lluvia efectiva (*es decir, la proporción de lluvia que es la respuesta del caudal*) (Zeiger & Hubbart, 2021).

3. Aplicación de un modelo hidráulico con HEC-RAS, Civil 3d y Google Earth

Se pretende conocer el comportamiento del río Oquish ante eventuales crecidas con el objetivo de simular posibles sucesos de inundación en la zona de estudio en el transcurso de tiempo. Se proporcionan los siguientes datos:

- ✓ Curvas de nivel de la zona de estudio.
- ✓ Secciones transversales (100m ancho) cada 25m.
- ✓ Longitud del río: 600 m.
- ✓ Los datos de períodos de retorno y caudal de diseño se detallan en la tabla 5.

Tabla 5*Valores de período de retorno (años)*

Períodos de retorno	Caudal(m ³ /s)
TR 10	33
TR 25	37
TR 50	42
TR 100	45

Coefficiente de Manning

Considerando que no se poseen suficientes datos sobre las condiciones para la valoración del coeficiente de rugosidad a lo largo del curso del río. Por consiguiente, los coeficientes de rugosidad de Manning se adaptarán en base a los datos de la Tabla 1 mencionada anteriormente. En tal sentido, se indican los valores para el cauce principal y para el área de inundación.

Tabla 6*Valores de rugosidad según Manning*

Rugosidad según Manning (n)		
N #1	N #2	N #3
0.035	0.04	0.035

3.1. Metodología

La metodología empleada en el presente modelamiento comprende los siguientes procedimientos:

- A. El pre - proceso que se realizará con el Software Civil 3D.
- B. El proceso principal se realizará con el software HEC-RAS 5.0.7
- C. El post - proceso se realizará con el programa Google Earth.

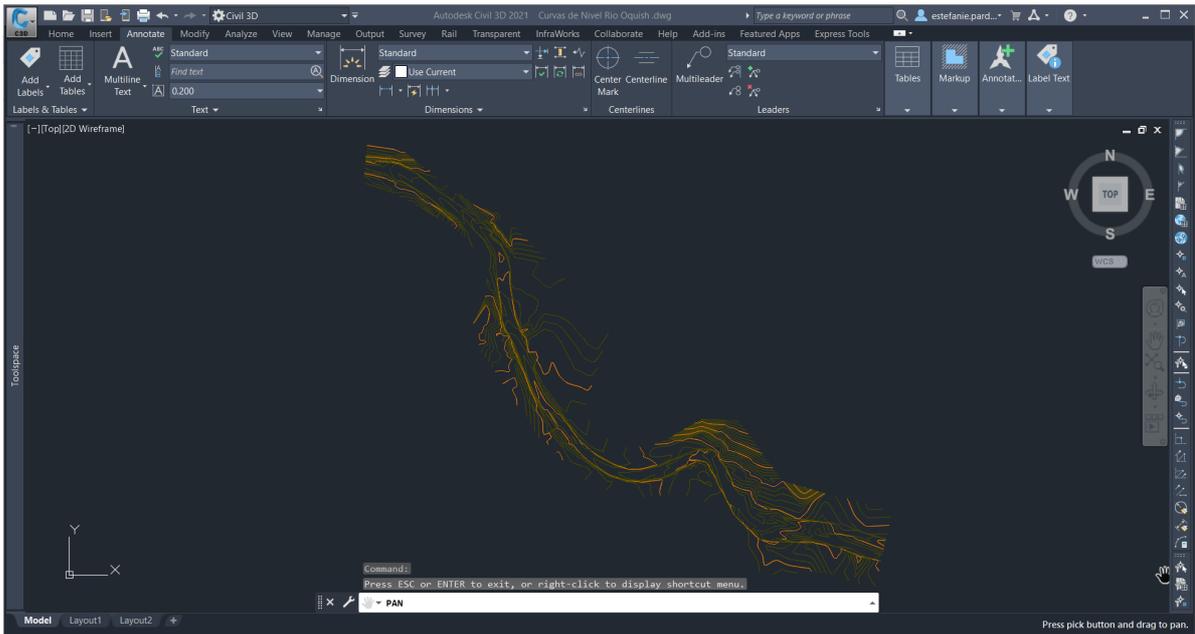
3.2. Civil 3D

En el Civil 3D se prepara el eje del río y las secciones transversales a partir de la topografía proporcionada en formato **.dwg** extraído de la empresa CIDHMA Ingenieros y luego se exportarán estas secciones al HEC-RAS.

1. Se trabaja con el archivo de curvas de nivel del río, la cual previamente se recopila del área de estudio. Cabe señalar, que debe estar debidamente georreferenciado con el sistema de coordenadas UTM.

Figura 37

Topografía del río Oquish

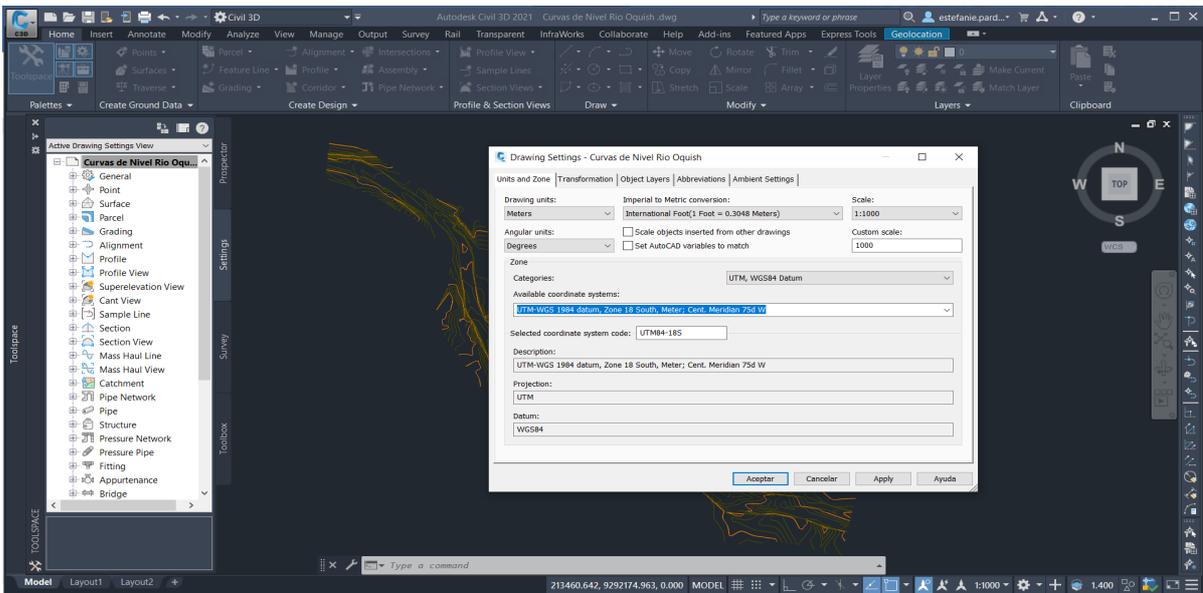


Nota. CIDHMA Ingenieros

2. Por ende, se procede a colocar el sistema de coordenadas a UTM, WGS84-18S DATUM. Se ejecuta el **Toolspace / Settings/ Curvas de nivel/ Edit Drawing Setting**.

Figura 38

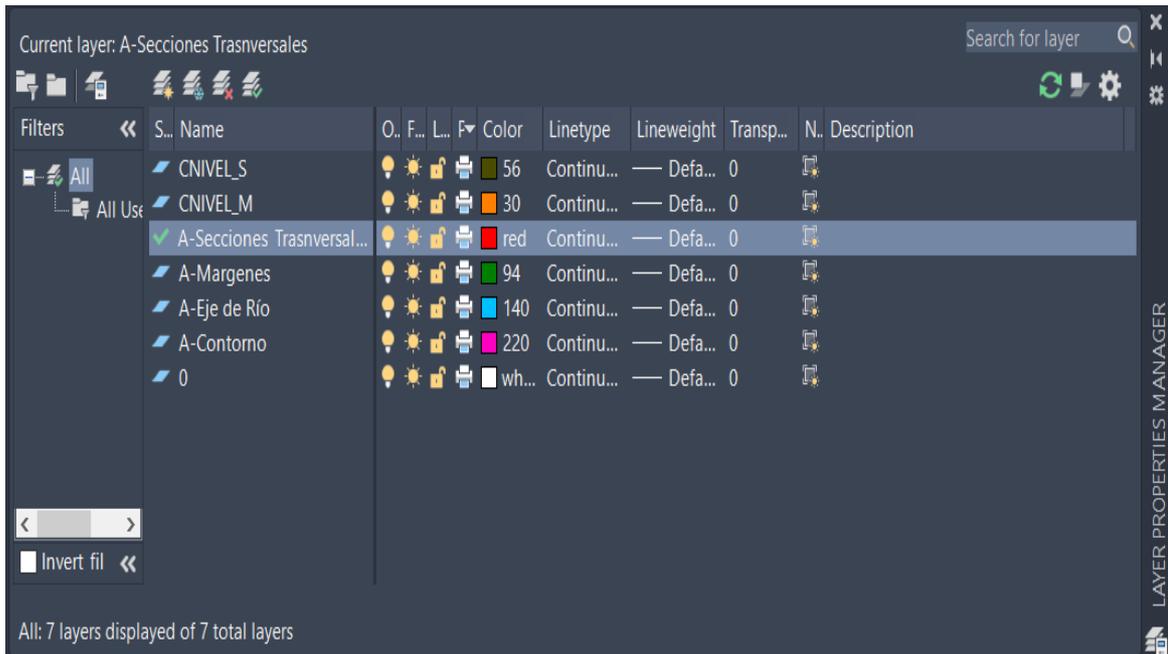
Ventana Drawing Setting



3. Se continúa con la opción **Layer Properties** para crear capas de trabajo.

Figura 39

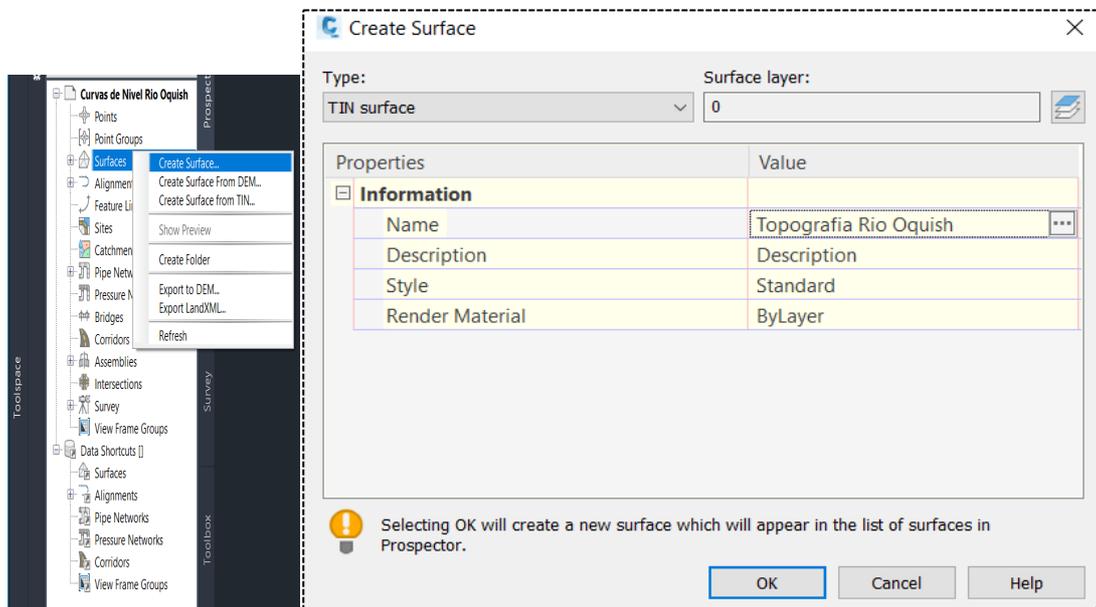
Ventana de Layer Properties



4. Se genera la superficie de terreno haciendo clic en **Prospector/ Surfaces/ Create Surfaces** y se le asigna un nombre.

Figura 40

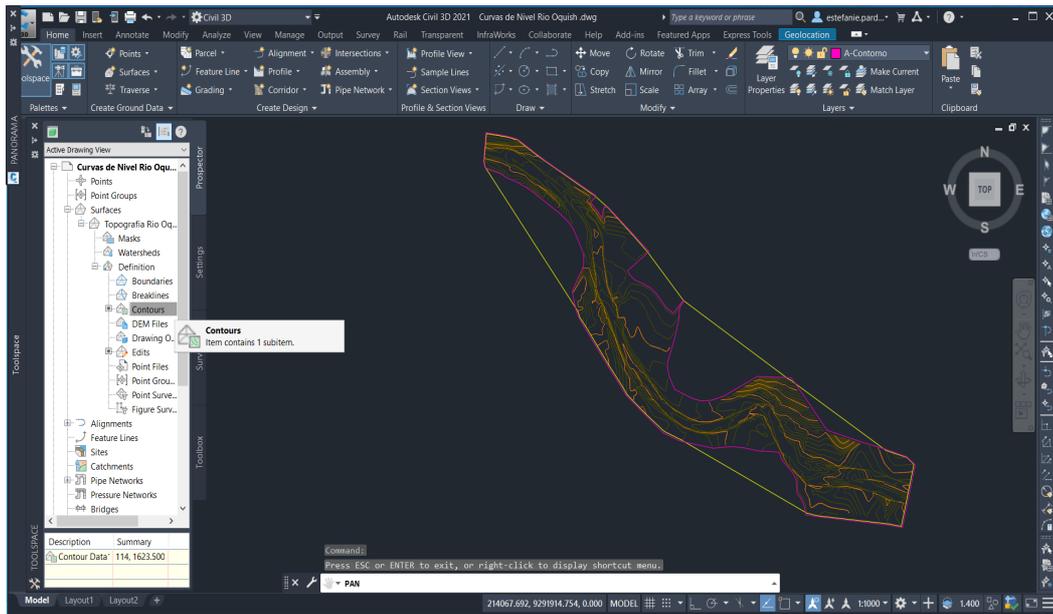
Ventana para crear la Superficie



5. Después de esto, se añade datos de curvas de nivel, luego se ejecuta desplegando **Surface** y se va a **Definition/ Contourns/ Add**, donde se muestra una ventana en la cual no se realiza ninguna modificación y le dan **Ok**. Luego se seleccionan todas las curvas de la topografía y se da **Enter**. Así mismo, se escoge el **layer contorno** y se dibuja el contorno con polilíneas lo más cercano a las curvas de nivel.

Figura 41

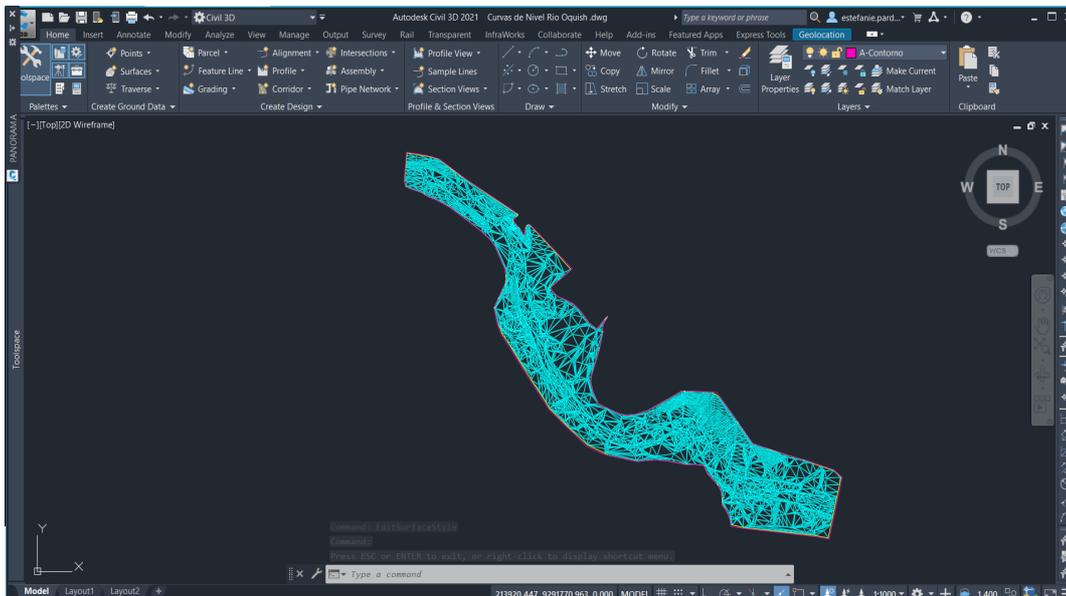
Ventana para añadir curvas de nivel



6. Posterior a esto se usa **Boundary**, se selecciona la polilínea de contorno haciendo clic en **Add** y muestra una ventana y se le da **Ok**. Este proceso tiene como propósito delimitar la zona para tener una interpolación más óptima y evitar los **breakline** fuera del contorno.

Figura 42

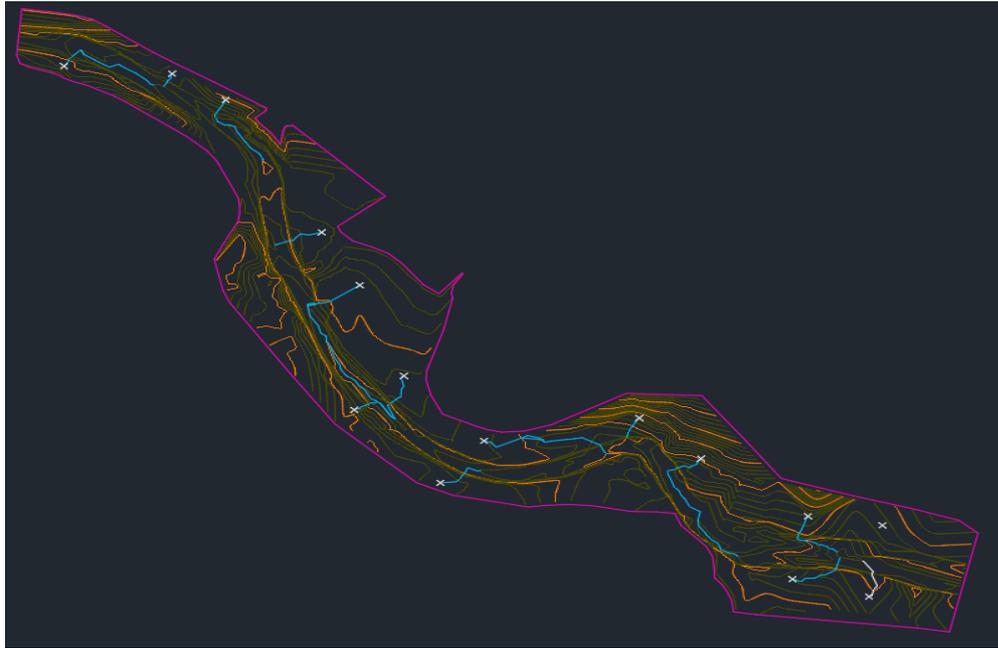
Delimitación de la zona de trabajo



7. Luego, se utiliza la herramienta **Water Drop** o **Gota de Agua**, y selecciona el contorno de la topografía y se hace clic en el icono **Water Drop**; luego se hace clic en cualquier parte de la topografía para que muestre la dirección del eje del río.

Figura 43

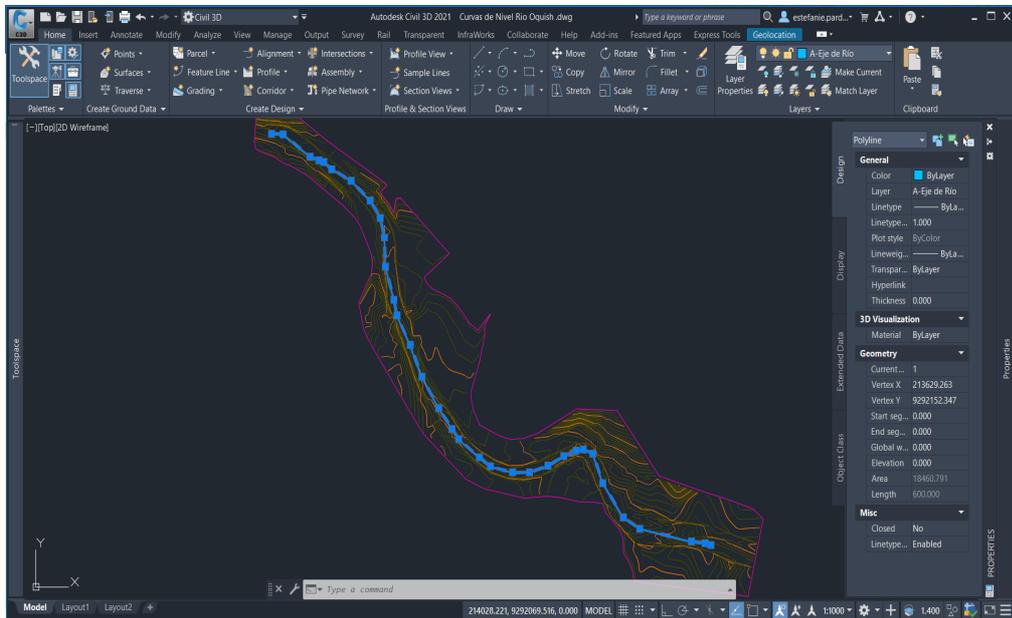
Simular trayectoria del eje de río



8. Siguiendo con el proceso se traza el eje del río, se selecciona la capa de este y se dibuja usando la herramienta polilínea. En este caso la longitud del río será 600 m.

Figura 44

Eje del río



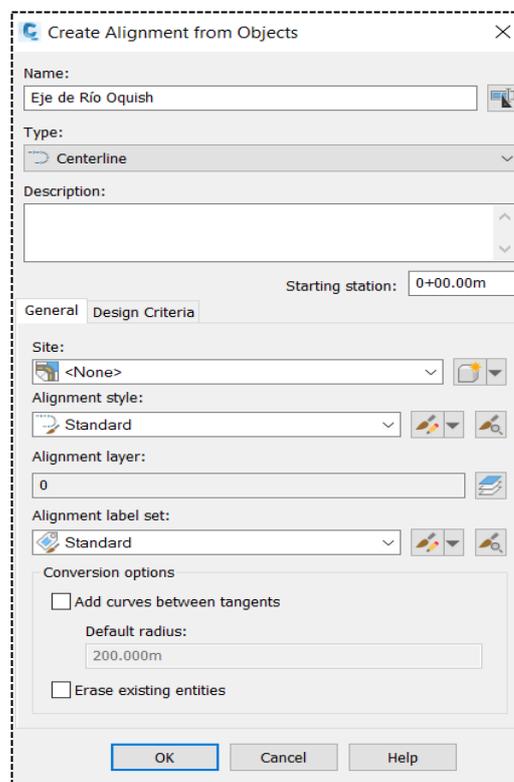
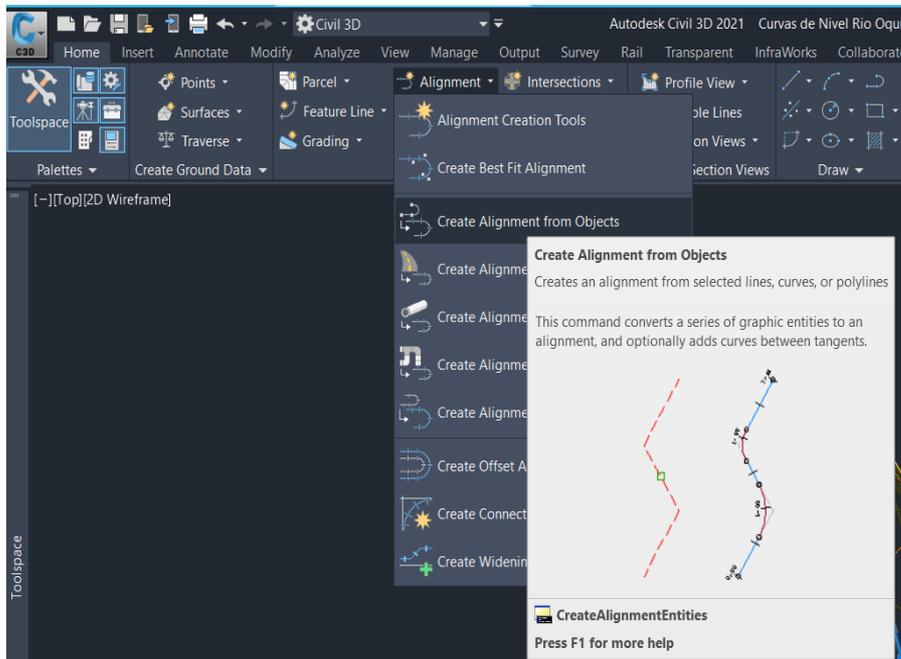
Nota. Las correcciones de la longitud del río se realiza con la herramienta lengthen/ t/ 600.

9. Se continúa con el eje trazado, lo convierte en alineamiento con la herramienta **alignment/create alignment from objects** que se encuentra en la parte superior de la barra en la pestaña **Home**, se ejecuta y luego clic en la parte superior del eje del río, y se muestra una ventana de **Reverse** no seleccionada. Luego, se muestra una

ventana donde se coloca el nombre del eje. Se usa esta herramienta con el propósito de modificar que el cero (0) debe estar aguas abajo.

Figura 45

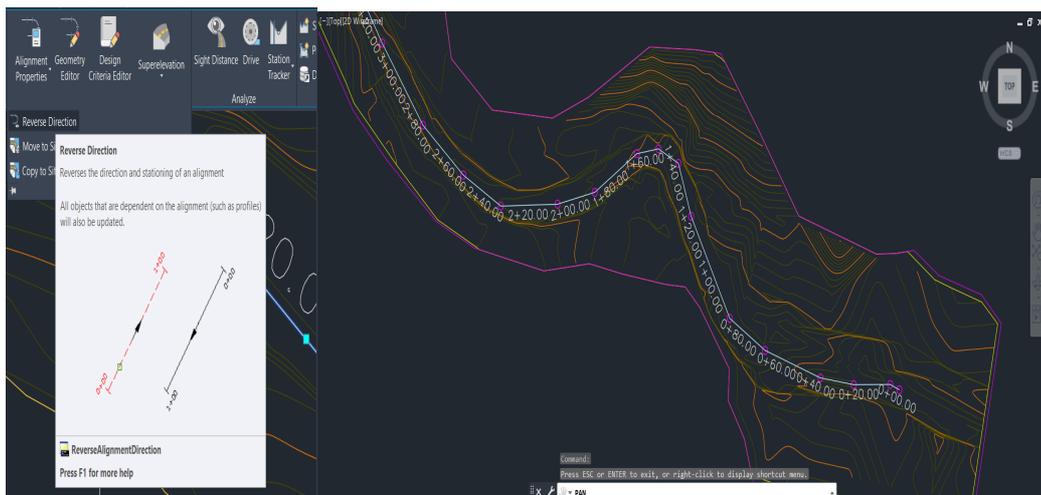
Ventana Create Alignment from objects



10. Se borra la presentación de números y luego se selecciona el alineamiento para invertir el eje con la herramienta **Modify/Reverse Direction**, después sale una ventana de advertencia y se le da clic en Aceptar, generándose que el cero (0) estas aguas abajo.

Figura 46

Ventana de modificaciones

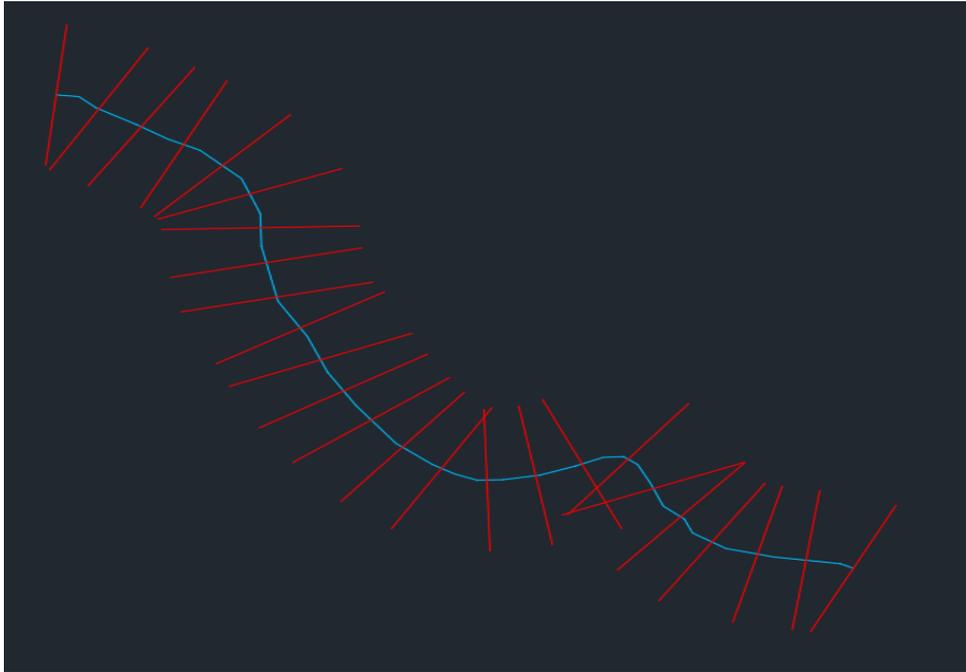


11. Ahora, se trabaja en la capa de secciones transversales, donde se crea secciones de con polilínea convertidas en **bloques** que mida 100m. El objetivo es crear secciones transversales a una determinada distancia que sean perpendiculares al eje del río y que forme 90° .

Esto se realiza con el comando **Measure**, primero se selecciona **el eje del río/Enter/escibimos BLOCK/escibimos nombre del bloque/Yes**. Para finalizar, se coloca la distancia de separación en este caso será cada 25m.

Figura 47

Secciones transversales

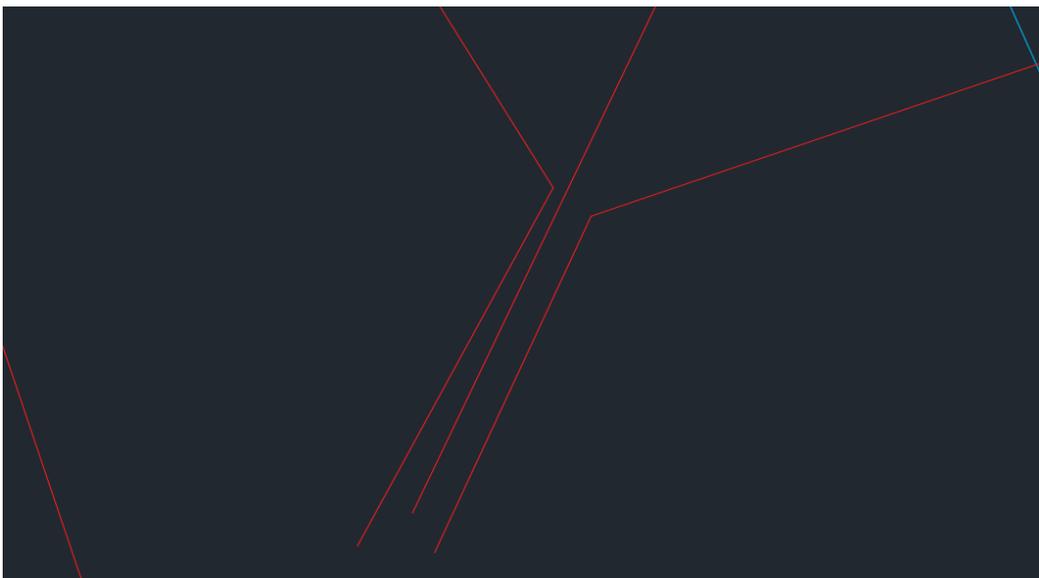


Nota. Será necesario dibujar manualmente la primera sección transversal en la parte inicial del eje y luego, los demás bloques convertirlos a polilíneas con el comando Explode.

12. Se observa que algunas secciones se están cruzando entre ellas. Para corregir dichos cruces, se modifica con polilíneas perpendiculares a líneas que se tienen. Además de ello, se modifica la distancia con el comando **Lengthen/ t/ 100**.

Figura 48

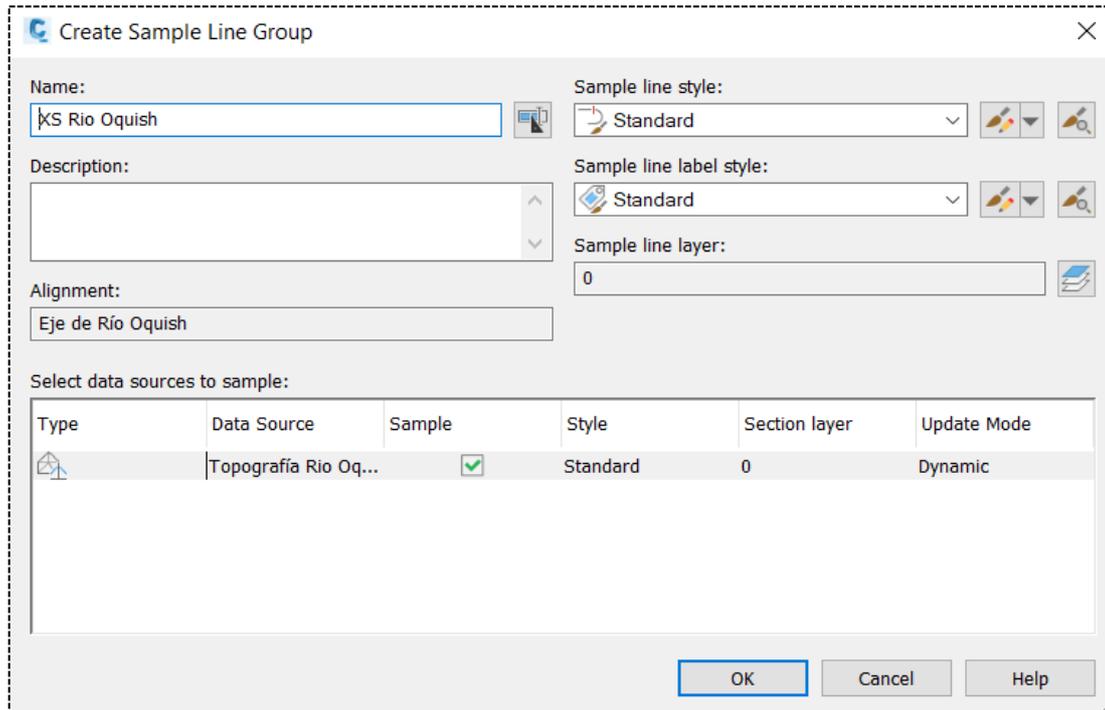
Corrección de las secciones



13. Después, se dirige a la opción **Sample Line/ Enter** se muestra una ventana, se pulsa **Ok**, luego en la siguiente ventana se coloca el nombre.

Figura 49

Ventana Sample Line



14. A partir de ello se escoge en el **Sample Line Tools** la opción **select existing polylines**, después se selecciona las polilíneas de las secciones y doble clic para finalizar.

Figura 50

Ventana Sample Line Tools

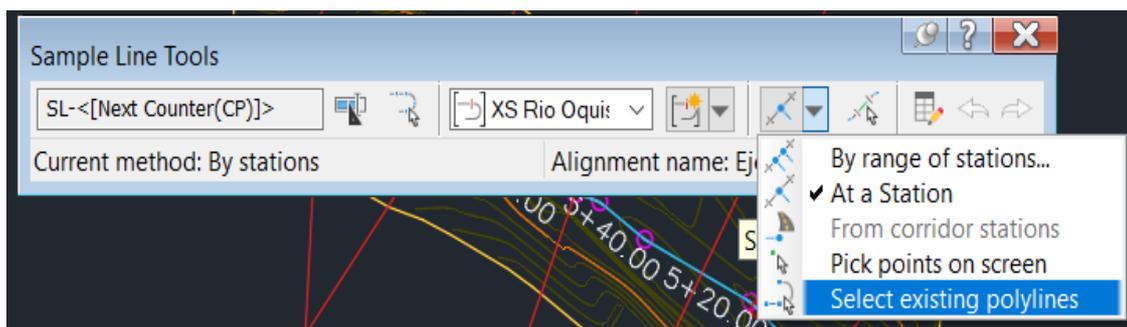
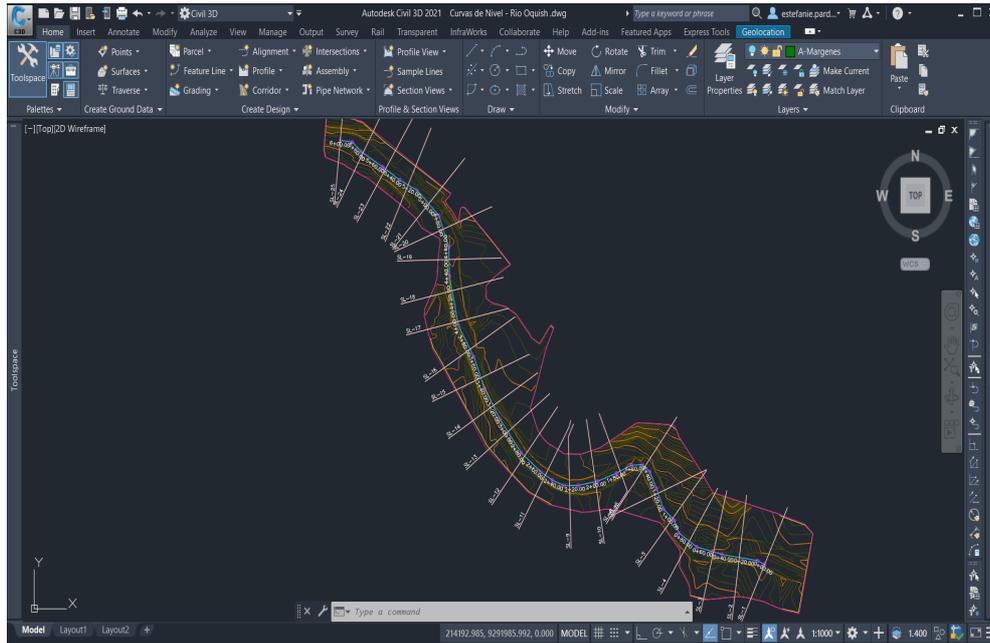


Figura 51

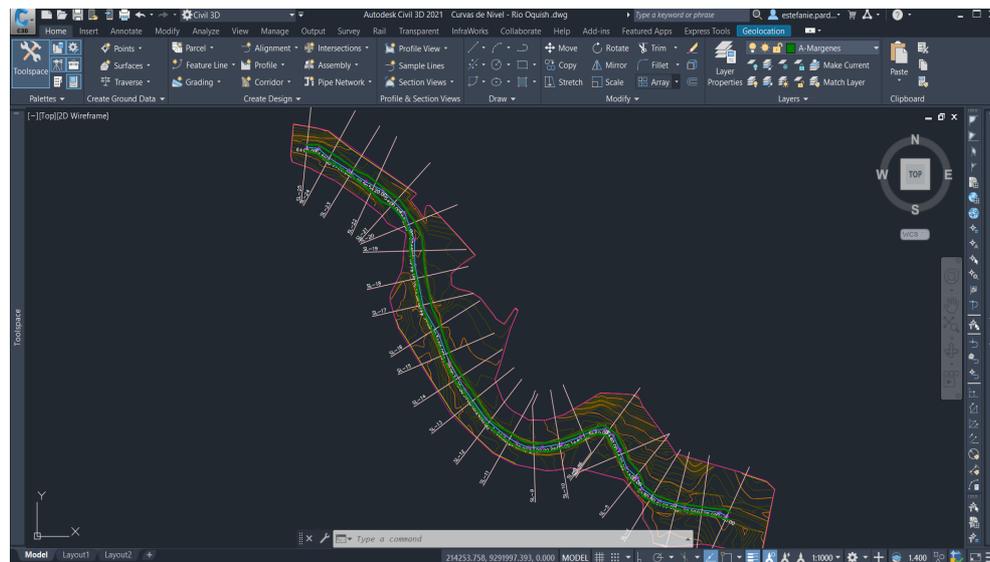
Secciones transversales



15. Se continúa con el desarrollo de los márgenes de río para el cual, lo ideal es que el topógrafo debería entregar ya esas las líneas. En su defecto, si no se cuenta con esta información, se puede dibujar las polilíneas a mano alzada con ciertos criterios considerando los límites del cauce del río.

Figura 52

Márgenes del río



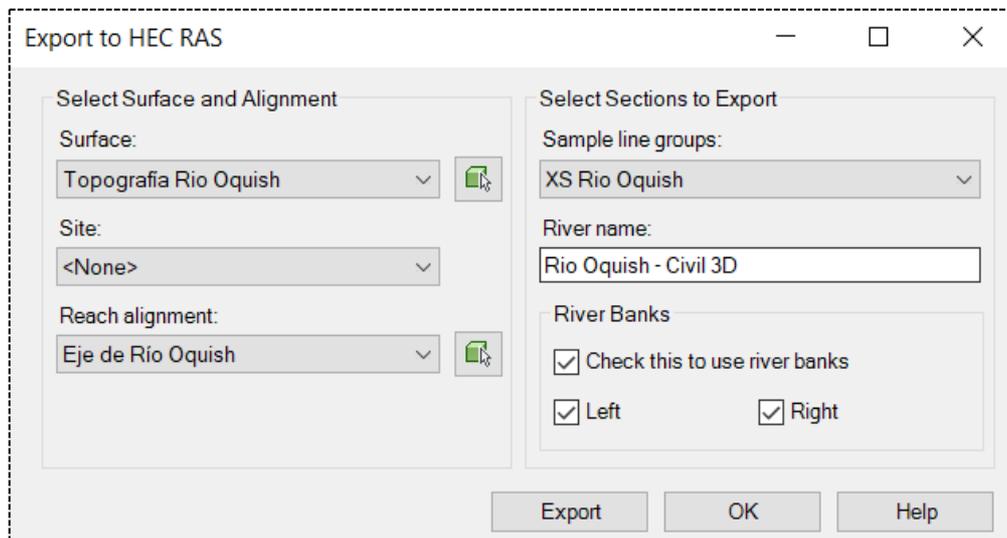
16. Terminado el pre-proceso, se procede a exportar estas secciones al formato HEC-RAS. Para ello, se va a la barra superior a la pestaña **Output** para ubicar **export to HEC RAS**.

Figura 53
Barra Civil 3D



Luego, la ventana muestra los detalles de la topografía, secciones transversales y el eje de lo que se exporta. En **River Banks** se definirá el margen derecho e izquierdo respectivamente. Finalmente, se le da un nombre y clic en **Export**.

Figura 54
Ventana de Exportar



3.3. HEC- RAS

1. Se comienza con el proceso en HEC-RAS, asignando las unidades en el sistema métrico ya que en Civil 3D fue trabajado en el sistema de unidades métricas; se continúa con la creación de un nuevo proyecto seleccionando **File/New Project**.

Figura 55
Sistemas de unidades

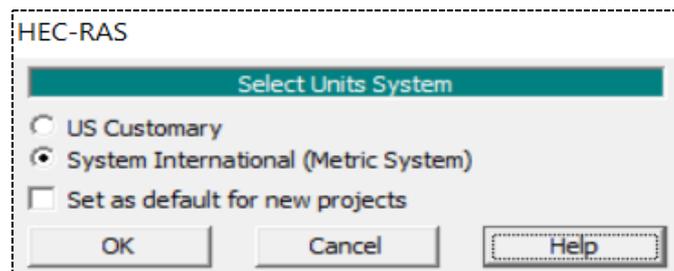
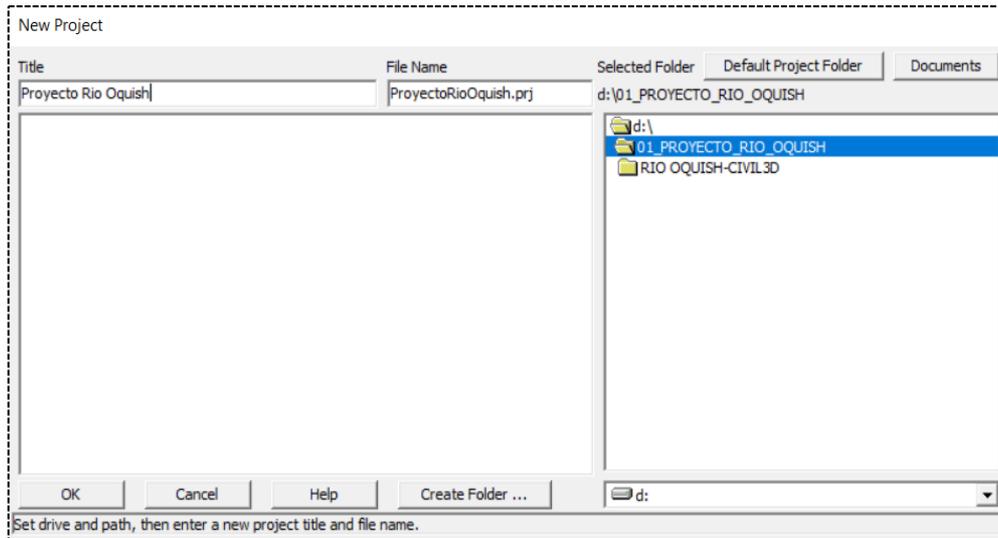


Figura 56

Ventana Nuevo Proyecto



Nota. Los datos geométricos en este caso no se realizará, dado que estos serán exportados del Civil 3D.

2. Para importar los datos de Civil 3D en HEC-RAS, primero se va al icono **Edit/Geometric Data**. Luego en la ventana de geometría, se hace clic en **File/Import Geometry Data/GIS** forma y se ubica el archivo creado en Civil 3D y haga clic en Aceptar.

Figura 57

Ventana Geometric Data

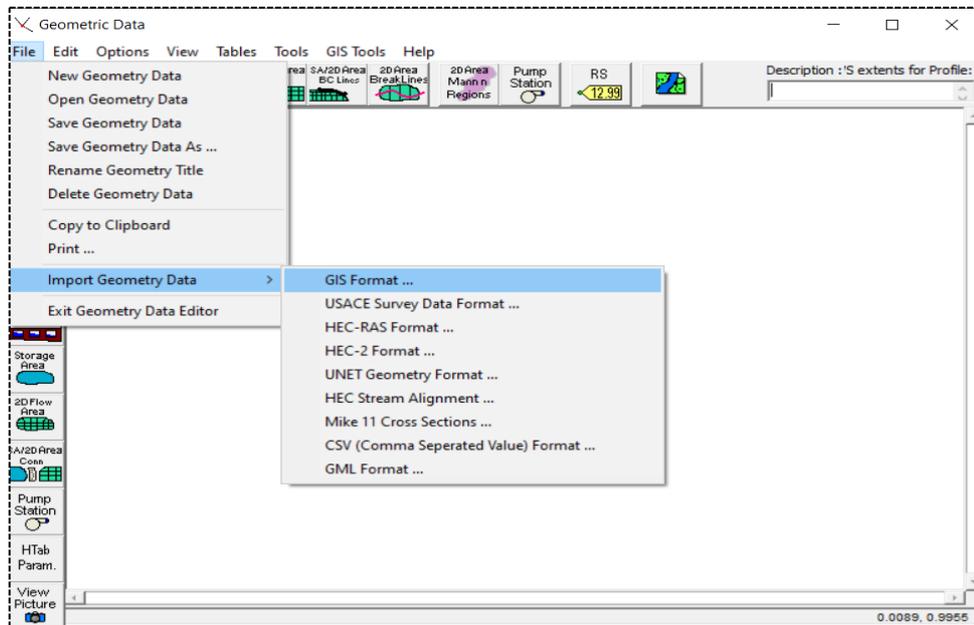
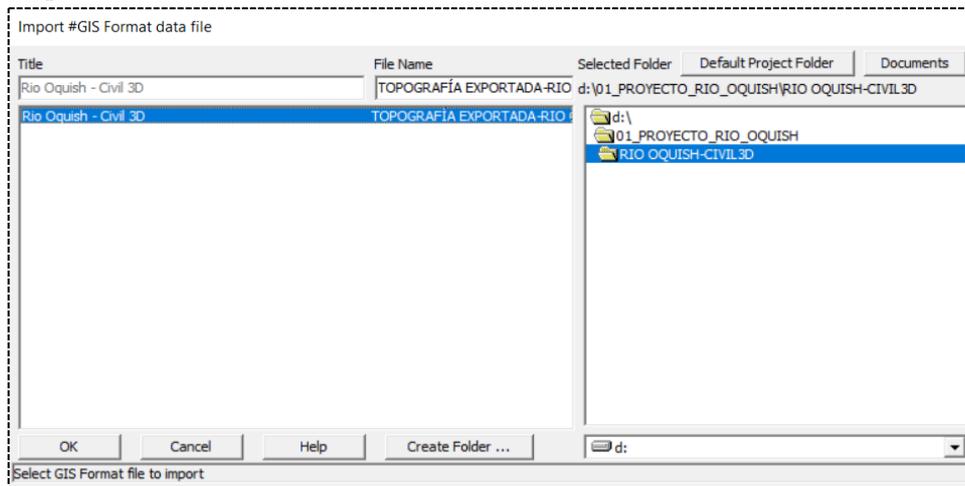


Figura 58

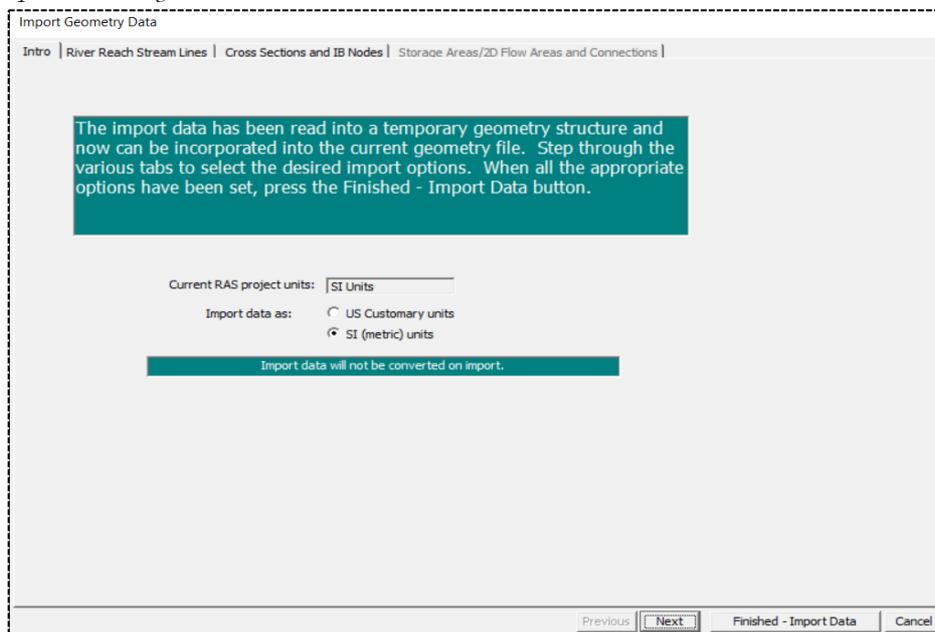
Ventana de importar datos



3. Posteriormente, se muestra la ventana para confirmar las unidades en el Sistema Internacional de medidas y haga clic en Siguiente.

Figura 59

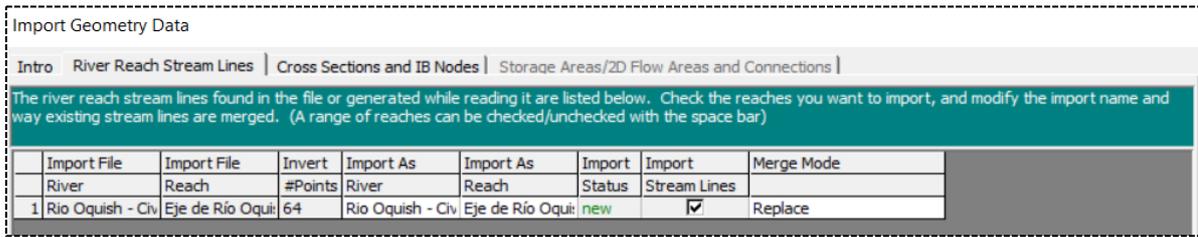
Ventana Import Geometry Data



Al pasar a la siguiente ventana, se confirma el nombre del río, así como que estén marcado en el cuadro de líneas de flujo de importación y clic en Siguiente.

Figura 60

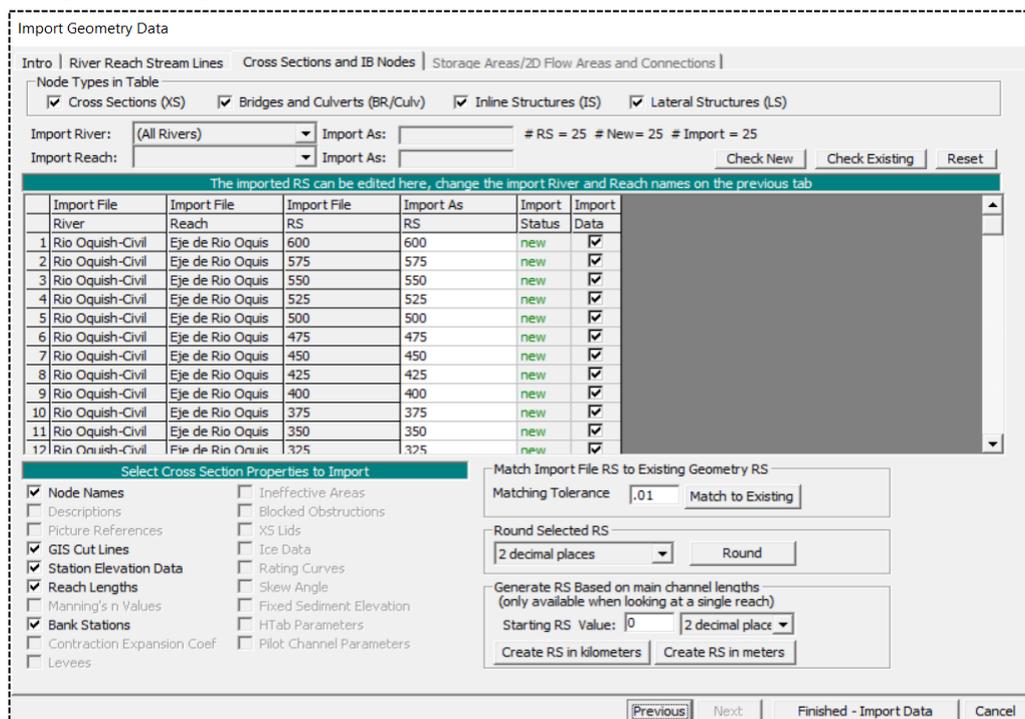
Ventana de Import Geometry Data



En la siguiente ventana se confirma los datos de las secciones transversales, comprobando que todos los cuadros Importar datos estén marcados para las secciones transversales y haga clic en **Finished – Import Data**.

Figura 61

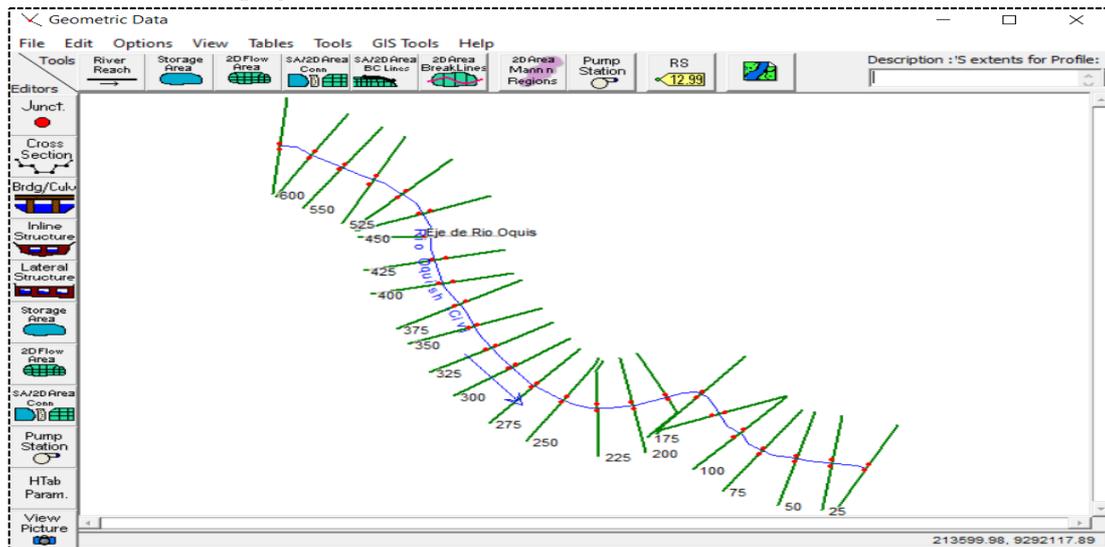
Ventana Import Geometry Data



- Los datos se importan al editor geométrico HEC-RAS pudiéndose visualizar las secciones transversales y el eje del río.

Figura 62

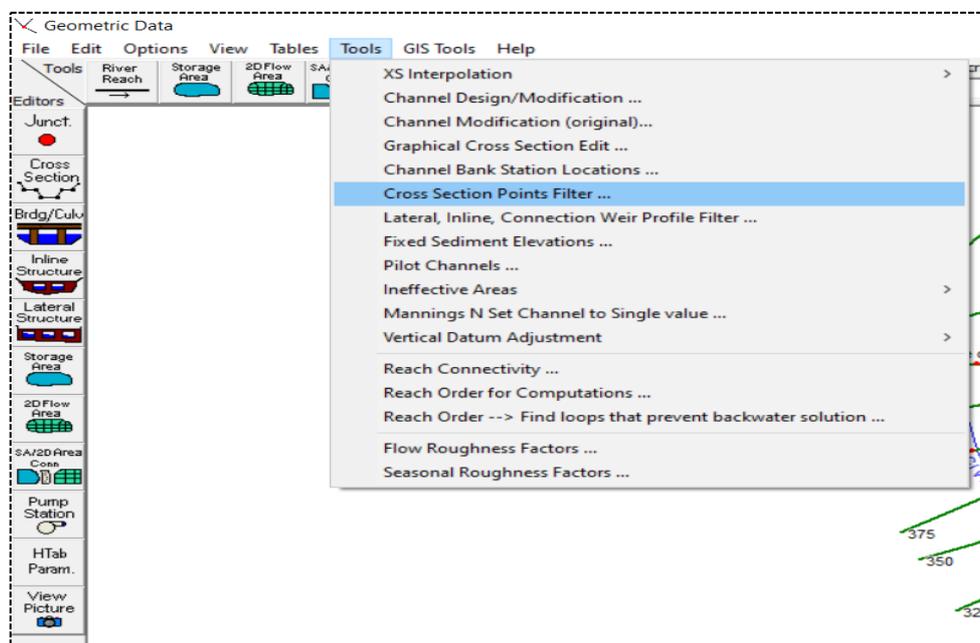
Secciones transversales en el programa HEC-RAS



5. Al importar las secciones transversales, puede tener puntos de elevación que muchos de ellos no son necesarios. Para solucionar este problema se usa el filtro de sección transversal que tiene el programa. Así que se hace clic en **Tool/Cross Section Points Filter**.

Figura 63

Ventana Geometric Data



En la ventana sección transversal **Point Filter**, clic en la pestaña **Multiple Locations**. Luego, en el menú desplegable **River Sta**, seleccione la opción **(All Rivers)** y en el botón de flecha de selección para importar a la otra ventana. Se continúa y se selecciona en la parte inferior donde dice **Filter Point on Selected XS**.

Figura 64

Ventana sección Transversal Point Filter

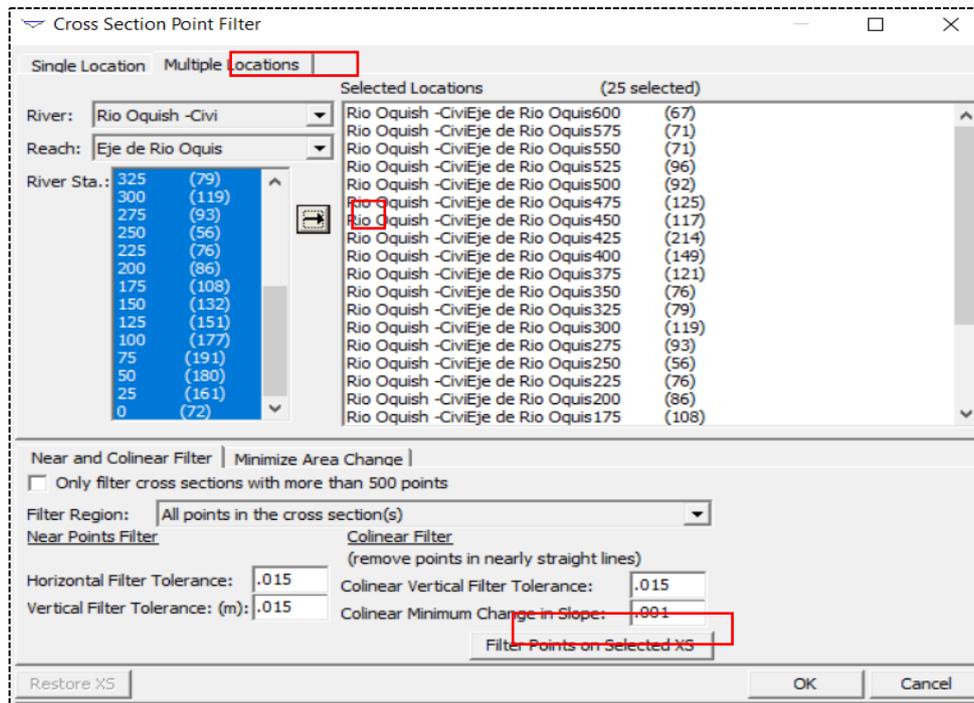


Figura 65

Resultado del filtro

HEC-RAS

Summary of filter results.

	River	Reach	RS	Prev Points	New Points	# Removed
1	Rio Oquist	Eje de Rio	600	67	65	2
2	Rio Oquist	Eje de Rio	575	71	61	10
3	Rio Oquist	Eje de Rio	550	71	58	13
4	Rio Oquist	Eje de Rio	525	96	81	15
5	Rio Oquist	Eje de Rio	500	92	71	21
6	Rio Oquist	Eje de Rio	475	125	103	22
7	Rio Oquist	Eje de Rio	450	117	91	26
8	Rio Oquist	Eje de Rio	425	214	173	41
9	Rio Oquist	Eje de Rio	400	149	137	12
10	Rio Oquist	Eje de Rio	375	121	111	10
11	Rio Oquist	Eje de Rio	350	76	71	5
12	Rio Oquist	Eje de Rio	325	79	72	7
13	Rio Oquist	Eje de Rio	300	119	97	22
14	Rio Oquist	Eje de Rio	275	93	84	9
15	Rio Oquist	Eje de Rio	250	56	51	5
16	Rio Oquist	Eje de Rio	225	76	62	14
17	Rio Oquist	Eje de Rio	200	86	71	15
18	Rio Oquist	Eje de Rio	175	108	84	24
19	Rio Oquist	Eje de Rio	150	132	118	14
20	Rio Oquist	Eje de Rio	125	151	132	19
21	Rio Oquist	Eje de Rio	100	177	140	37
22	Rio Oquist	Eje de Rio	75	191	149	42
23	Rio Oquist	Eje de Rio	50	180	151	29
24	Rio Oquist	Eje de Rio	25	161	135	26
25	Rio Oquist	Eje de Rio	0	72	61	11

Nota. Se continúa ejecutando **Filter Point** las veces que sean necesarias hasta que se muestre mensaje de 'ningún punto fue removido'.

- Se continúa con la asignación del valor de rugosidad de Manning al río. Para esto se selecciona **Tables/Edit Manning's or k values**, aparece un cuadro y se le asigna el valor de rugosidad de Manning's que se menciona en los datos proporcionados. Una vez que aparece el cuadro, se selecciona toda la columna n#1, se irá al botón **Set Values** y se coloca el valor correspondiente, dicho proceso aplica en las siguientes columnas.

Figura 66

Asignación de los valores de la n de Manning

Edit Manning's n or k Values

River: Rio Oquish -Civi Edit Interpolated XS's Channel n Values have a light green background

Reach: Eje de Rio Oquis All Regions

Selected Area Edit Options

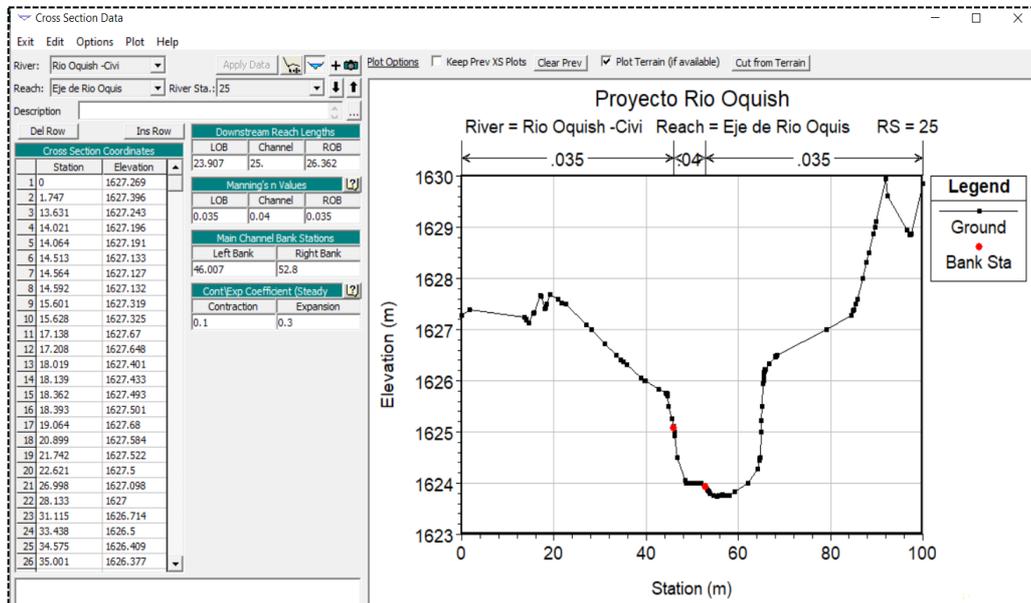
Add Constant ... Multiply Factor ... **Set Values ...** Replace ... Reduce to L Ch R ...

	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	600	n	0.035	0.04	0.035
2	575	n	0.035	0.04	0.035
3	550	n	0.035	0.04	0.035
4	525	n	0.035	0.04	0.035
5	500	n	0.035	0.04	0.035
6	475	n	0.035	0.04	0.035
7	450	n	0.035	0.04	0.035
8	425	n	0.035	0.04	0.035
9	400	n	0.035	0.04	0.035
10	375	n	0.035	0.04	0.035
11	350	n	0.035	0.04	0.035
12	325	n	0.035	0.04	0.035
13	300	n	0.035	0.04	0.035
14	275	n	0.035	0.04	0.035
15	250	n	0.035	0.04	0.035
16	225	n	0.035	0.04	0.035
17	200	n	0.035	0.04	0.035
18	175	n	0.035	0.04	0.035
19	150	n	0.035	0.04	0.035
20	125	n	0.035	0.04	0.035
21	100	n	0.035	0.04	0.035
22	75	n	0.035	0.04	0.035
23	50	n	0.035	0.04	0.035
24	25	n	0.035	0.04	0.035

OK Cancel Help

- Después de ingresar los datos, se procede a verificar las secciones transversales mediante la opción **Cross Section**.

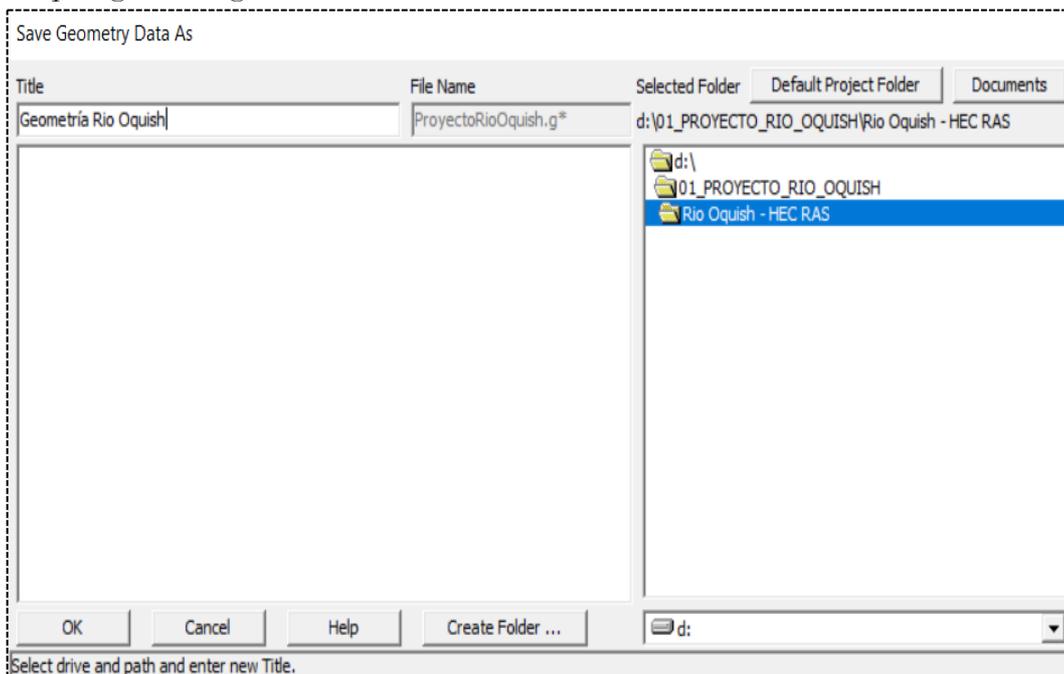
Figura 67
Ventana Cross Section Data



Nota. En las secciones transversales se tiene que los nodos de Manning (puntos rojos) están ubicadas incorrectamente el cual, se corregirán luego de realizar la simulación.

- Luego, se procede a guardar los datos, se hace clic en **File/Save Geometry Data**, luego se asigna un nombre. Finalmente, se observa en la ventana principal del HEC-RAS el nombre del archivo con la que se guardó.

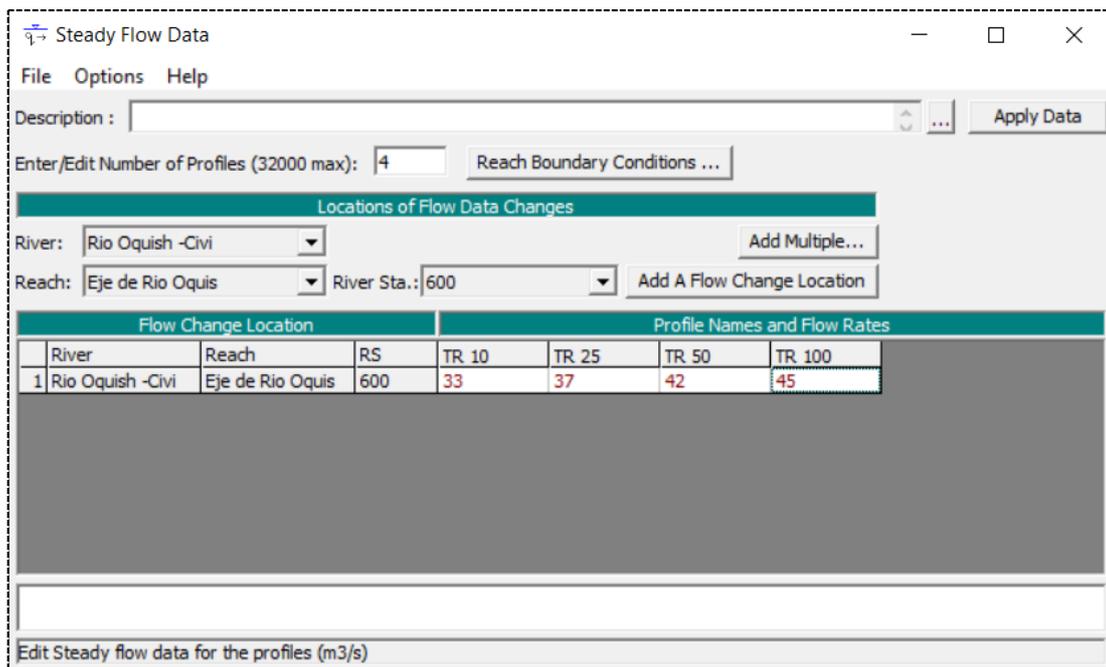
Figura 68
Ventana para guardar la geometría



- Una vez que han sido asignado los datos e ingresados los datos geométricos, se procede a configurar todos los datos de flujo permanente o no permanente. Para este caso, se asume un flujo permanente. En la ventana principal de HEC-RAS se ubica el icono **Edit/Steady Flow Data**. Primero se define el número de perfil en **Enter/Edit Number of Profiles**, que para este estudio fue 4 y clic en **Apply Data**, luego se le asigna los caudales proporcionados de acuerdo al tiempo de retorno.

Figura 69

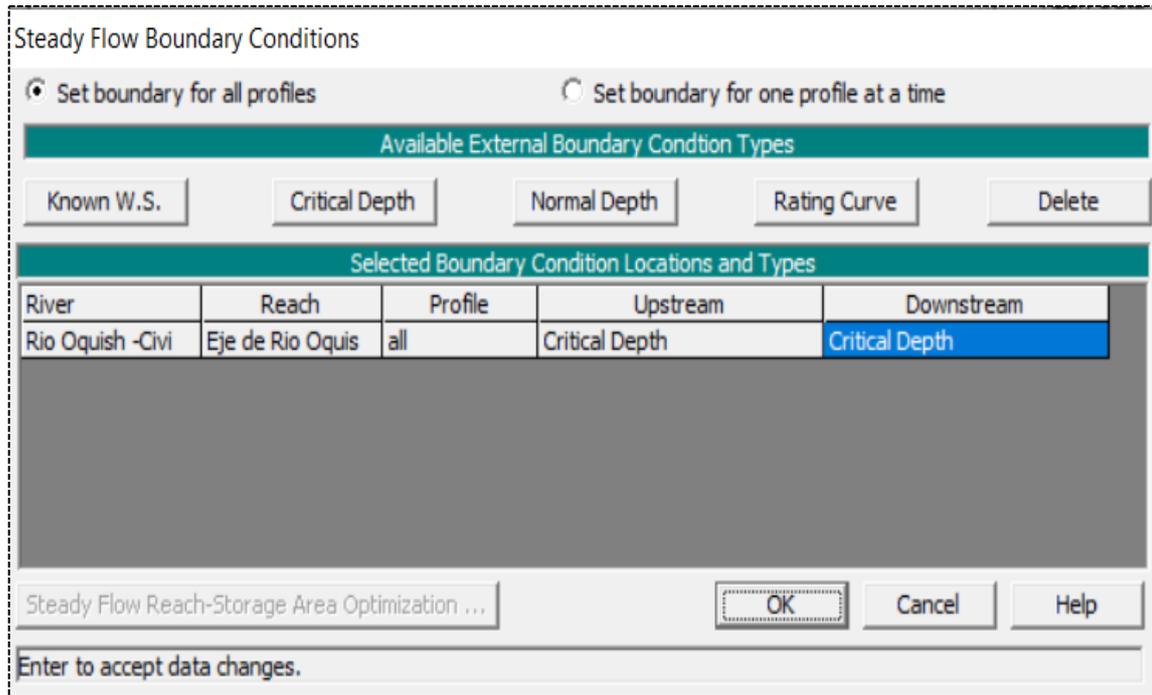
Entrada de datos de caudal, ventana Steady Flow Data



Después, se ingresan las condiciones de contorno, se accede y se selecciona **Reach Boundary Conditions**. Para este caso, se pone condiciones de contorno calado crítico (critical Depth) en el cual se estima la profundidad crítica para cada uno de los perfiles, ahora la utiliza como condición de terreno.

Figura 70

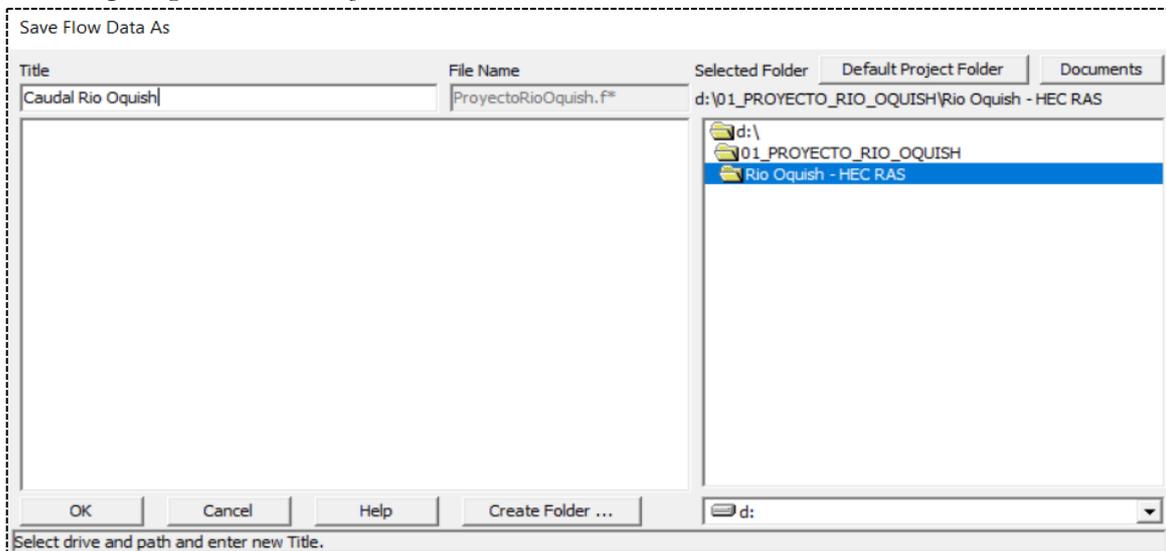
Ventana de condiciones de contorno en el HEC-RAS



10. Nuevamente se guardará el fichero de condiciones de flujo. Para ello, se va a **File/Save Flow Data**.

Figura 71

Ventana para guardar caudales y condiciones de contorno



11. Para realizar la simulación hidráulica se crea un plan para flujo permanente con los datos ya definidos. Para ello, se selecciona en el menú principal el icono **Perform a Steady flow Simulation**, se muestra una ventana donde se selecciona el tipo de régimen, en este caso para el modelo será un flujo de régimen mixto y se ejecuta la simulación seleccionando **Compute**.

Figura 72

Ventana de análisis de flujo no permanente

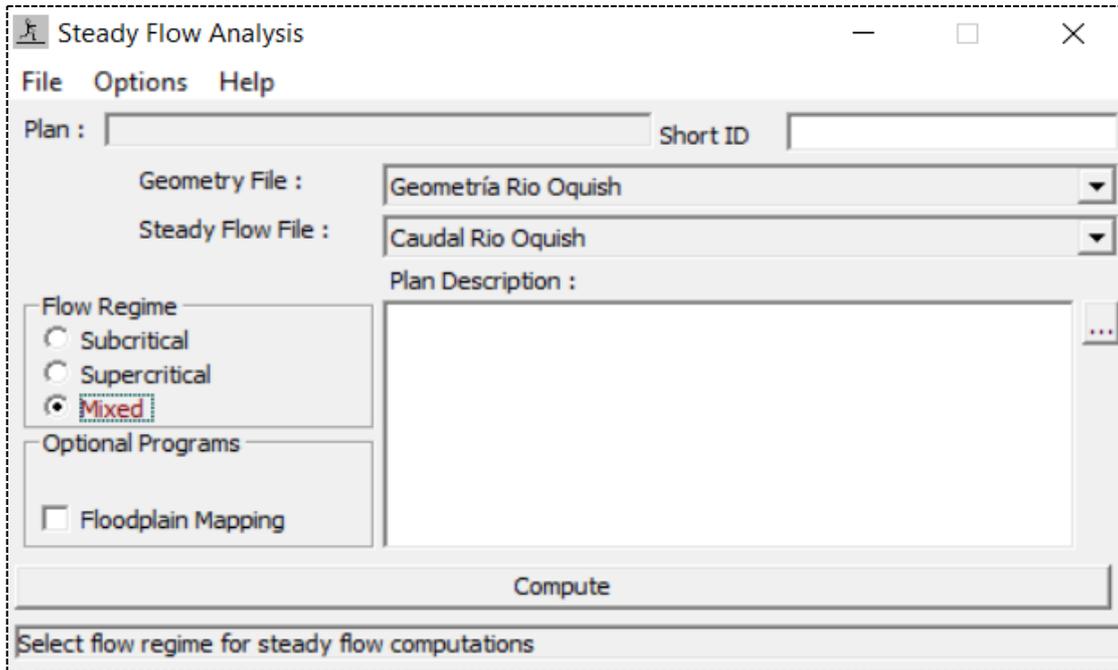
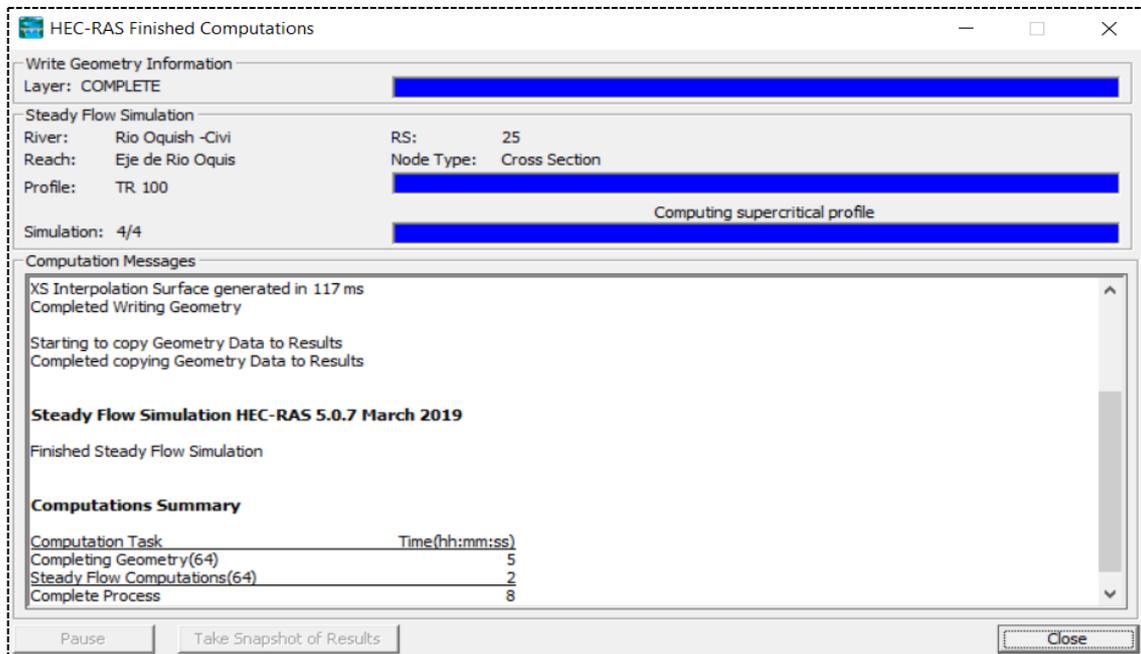


Figura 73

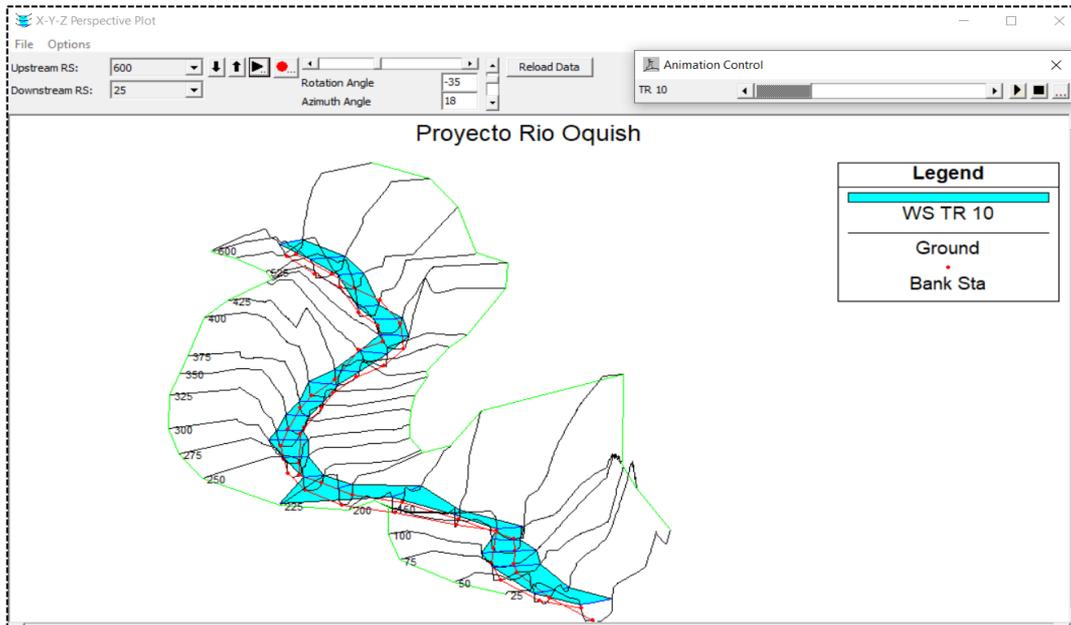
Proceso de Simulación



- Una vez simulado se verifica, corrige y visualiza los resultados tanto gráficos como tabulares. En primera instancia con la opción **View 3D Multiple Cross Section Plot** se visualiza el perfil del río en 3D, mostrando la crecida por cada período de retorno y los puntos rojos son los márgenes.

Figura 74

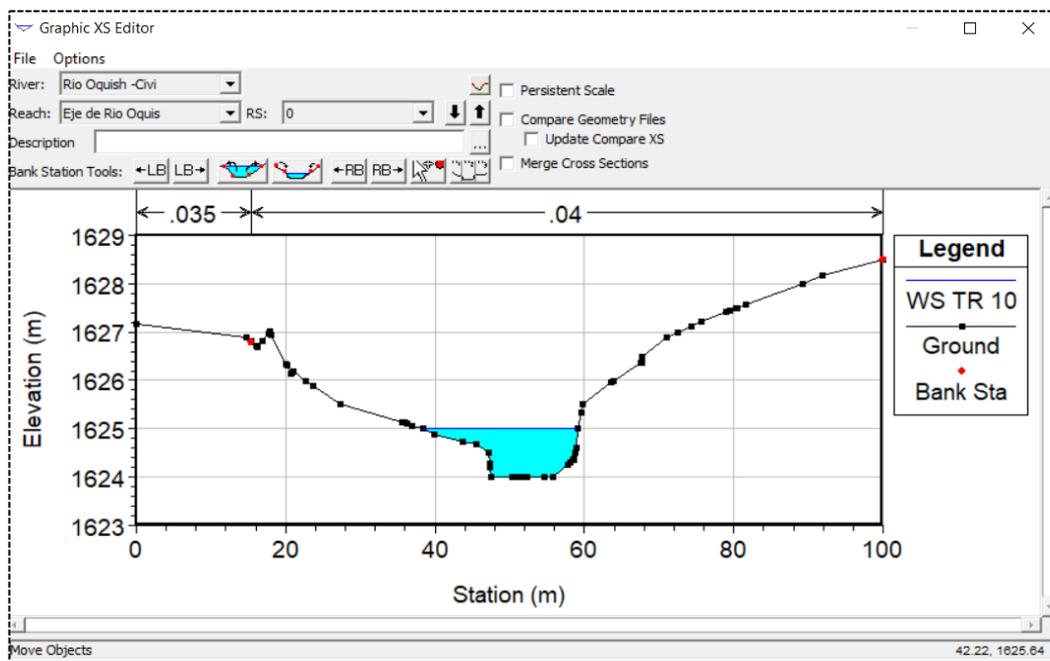
Perspectiva tridimensional de la Simulación



13. Como se observa, los rangos de Manning no encajan correctamente ya que deben estar al margen del río, por lo que se realiza una serie de ajustes. Para ello se va a la ventana de geometría, luego **Cross Section/Jump to Grafical Cross Section Editor**.

Figura 75

Ventana Editor Gráfico de secciones transversales



Se realiza las correcciones con las herramientas **Bank Station Tools** se retiran los nodos rojos al nivel del agua.

Figura 76

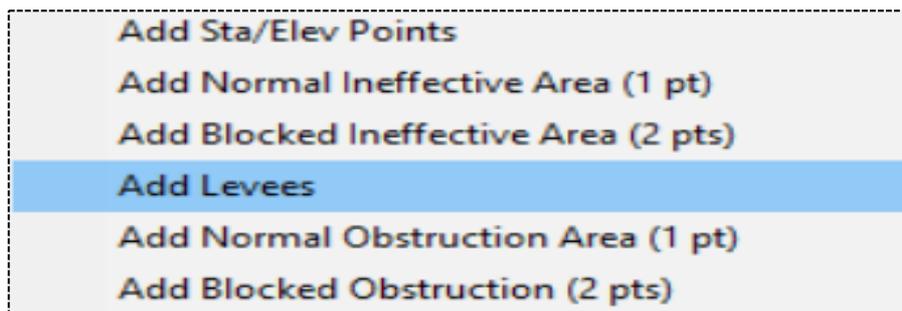
Ventana Bank Station Tools



En caso que el agua pase hasta otro nivel que no corresponde, se coloca límites haciendo clic derecho y seleccionado **Add Level**.

Figura 77

Ventana Add Level



3.4. Resultados del modelamiento

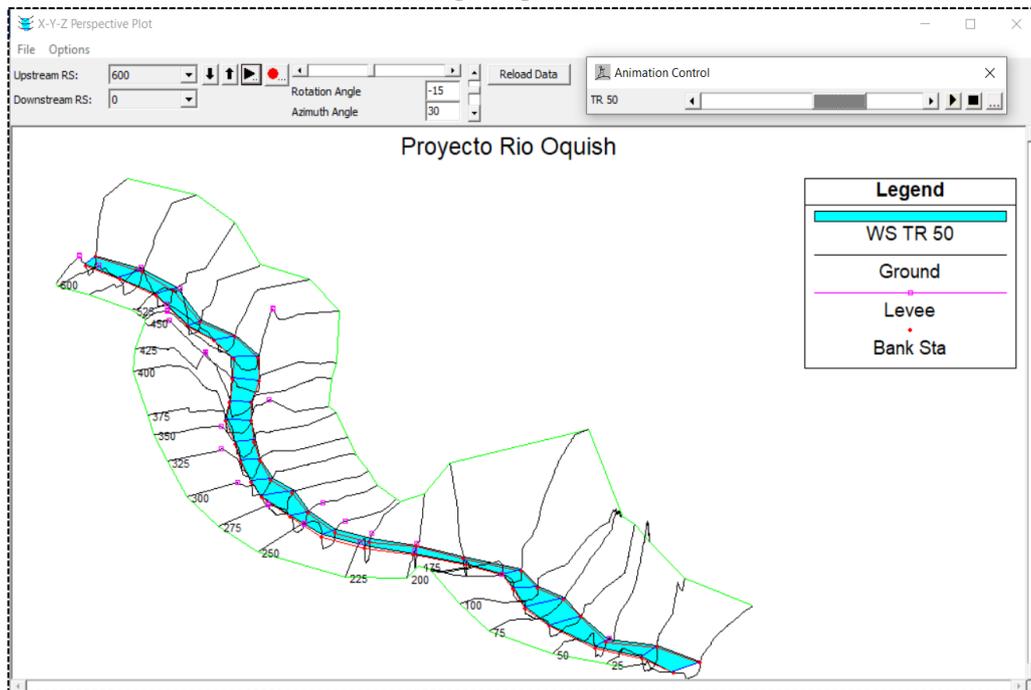
Una vez corregida la simulación correctamente, se pueden ver los resultados de forma gráfica y tabla.

3.4.1. Perfil de flujo en perspectiva 3D

A continuación, se presenta una vista en perspectiva tridimensional mediante la opción **View 3D multiple cross section plot**.

Figura 78

Vista 3D de las secciones transversales del río Oquish, para la simulación de TR=50 años

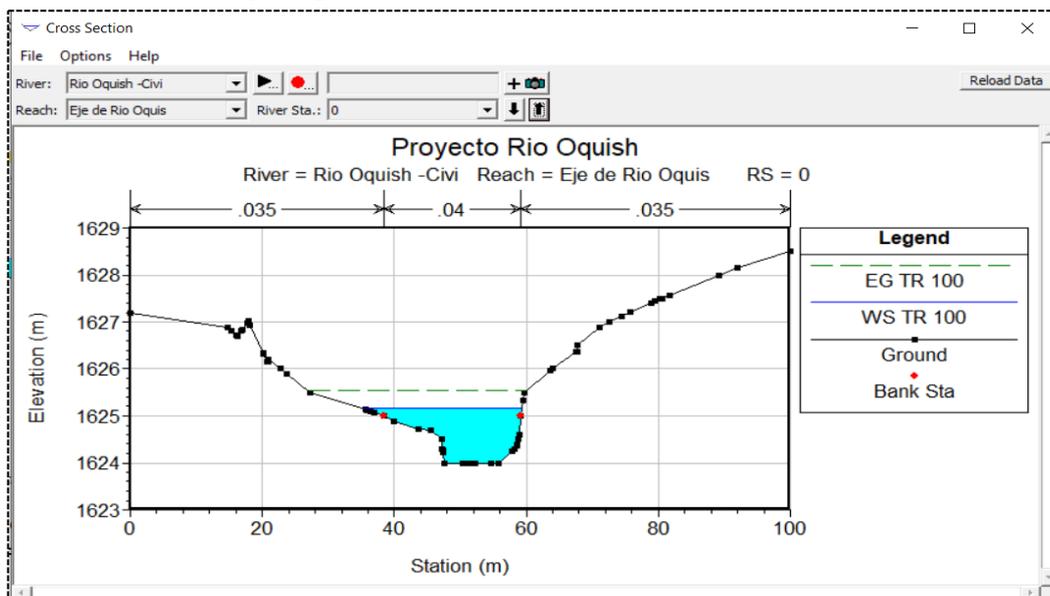


3.4.2. Secciones transversales

Para visualizar la perspectiva de las secciones transversales con la opción **View Cross Section**.

Figura 79

Sección transversal del río Oquish, para la simulación de TR=100 años

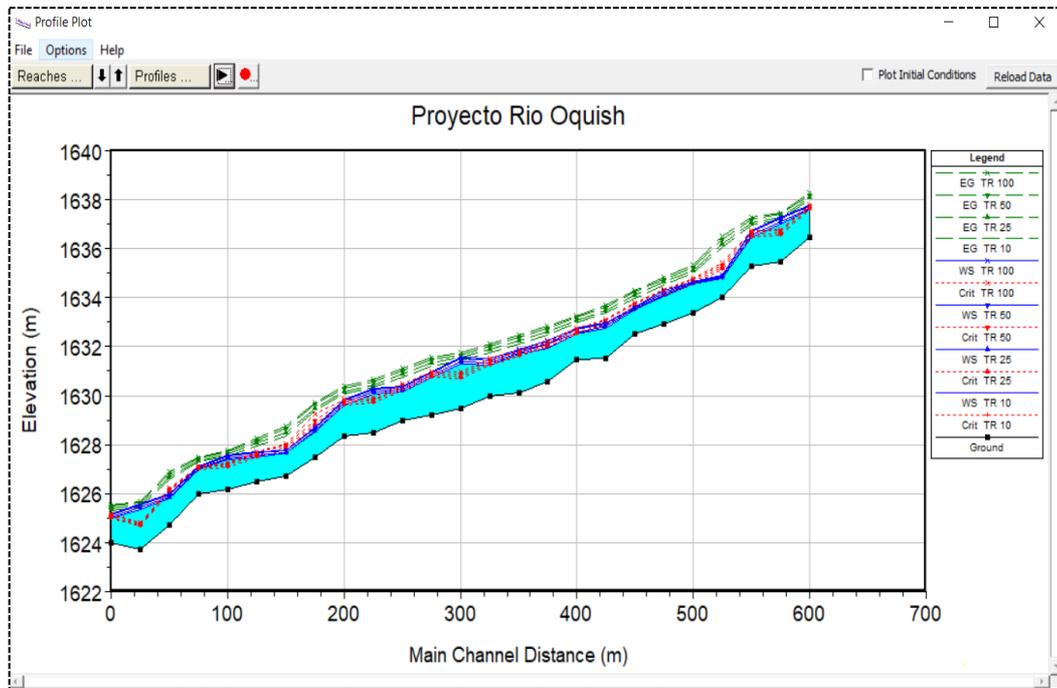


3.4.3. Perfiles longitudinales

Otra manera de visualizar los resultados son los perfiles longitudinales del río con la opción **View profiles**.

Figura 80

Perfil de flujo de la simulación



3.4.4. Tablas detalladas en secciones transversales

En las tablas se muestran información detallada de cada una de las secciones por períodos de retorno.

Figura 81

Tabla detallada de salida

Cross Section Output

File Type Options Help

River: Rio Oquish -Civi Profile: TR 25

Reach: Eje de Rio Oquis RS: 0 Plan: Rio Oquish

Plan: Rio Oquish		Rio Oquish -Civi	Eje de Rio Oquis	RS: 0	Profile: TR 25
E.G. Elev (m)	1625.40	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.34	Wt. n-Val.	0.035	0.040	0.035
W.S. Elev (m)	1625.05	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	1625.05	Flow Area (m2)	0.03	14.24	0.00
E.G. Slope (m/m)	0.018592	Area (m2)	0.03	14.24	0.00
Q Total (m3/s)	37.00	Flow (m3/s)	0.01	36.99	0.00
Top Width (m)	22.04	Top Width (m)	1.18	20.80	0.07
Vel Total (m/s)	2.59	Avg. Vel. (m/s)	0.35	2.60	0.30
Max Chl Dpth (m)	1.05	Hydr. Depth (m)	0.03	0.68	0.03
Conv. Total (m3/s)	271.4	Conv. (m3/s)	0.1	271.3	0.0
Length Wtd. (m)		Wetted Per. (m)	1.18	21.42	0.09
Min Ch El (m)	1624.00	Shear (N/m2)	4.87	121.23	3.84
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	1.69	314.80	1.14
Frctn Loss (m)		Cum Volume (1000 m3)			
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)			

Errors, Warnings and Notes

3.4.5. Tablas simplificadas para perfiles

La tabla muestra un resumen de los perfiles por cada sección transversal.

Figura 82

Perfil tabla de salida

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables User Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Rio Oquish River: Rio Oquish -Civi Reach: Eje de Rio Oquis Profile: TR 25 Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Eje de Rio Oquis	600	TR 25	37.00	1636.49	1637.64	1637.64	1638.08	0.017553	2.94	12.59	14.85	1.01
Eje de Rio Oquis	575	TR 25	37.00	1635.46	1637.11	1636.63	1637.28	0.004440	1.84	20.11	17.43	0.53
Eje de Rio Oquis	550	TR 25	37.00	1635.26	1636.57	1636.57	1637.06	0.016613	3.11	11.96	12.94	0.97
Eje de Rio Oquis	525	TR 25	37.00	1634.00	1634.82	1635.24	1636.21	0.071504	5.22	7.09	9.89	1.96
Eje de Rio Oquis	500	TR 25	37.00	1633.37	1634.59	1634.64	1635.12	0.019244	3.22	11.51	12.75	1.06
Eje de Rio Oquis	475	TR 25	37.00	1632.94	1634.11	1634.17	1634.64	0.019378	3.22	11.53	13.43	1.07
Eje de Rio Oquis	450	TR 25	37.00	1632.50	1633.55	1633.64	1634.10	0.024289	3.27	11.31	14.18	1.16
Eje de Rio Oquis	425	TR 25	37.00	1631.50	1632.84	1632.94	1633.48	0.024439	3.55	10.42	11.34	1.18
Eje de Rio Oquis	400	TR 25	37.00	1631.46	1632.58	1632.58	1633.06	0.017558	3.05	12.13	13.12	1.01
Eje de Rio Oquis	375	TR 25	37.00	1630.57	1632.09	1632.05	1632.60	0.014506	3.17	11.72	10.65	0.94
Eje de Rio Oquis	350	TR 25	37.00	1630.11	1631.76	1631.68	1632.24	0.013428	3.09	11.99	10.14	0.90
Eje de Rio Oquis	325	TR 25	37.00	1629.98	1631.36	1631.36	1631.87	0.016024	3.19	11.63	11.25	0.98
Eje de Rio Oquis	300	TR 25	37.00	1629.48	1631.39	1630.80	1631.55	0.003846	1.75	21.19	17.67	0.50
Eje de Rio Oquis	275	TR 25	37.00	1629.22	1630.82	1630.82	1631.34	0.017400	3.18	11.64	11.54	1.00
Eje de Rio Oquis	250	TR 25	37.00	1628.98	1630.25	1630.29	1630.87	0.019087	3.50	10.61	9.88	1.06
Eje de Rio Oquis	225	TR 25	37.00	1628.50	1630.14	1629.78	1630.45	0.006800	2.44	15.27	12.00	0.65
Eje de Rio Oquis	200	TR 25	37.00	1628.36	1629.70	1629.70	1630.17	0.017081	3.04	12.17	12.67	0.99
Eje de Rio Oquis	175	TR 25	37.00	1627.50	1628.59	1628.84	1629.50	0.040554	4.24	8.74	10.85	1.49
Eje de Rio Oquis	150	TR 25	37.00	1626.72	1627.69	1627.89	1628.49	0.038014	3.96	9.34	11.99	1.43
Eje de Rio Oquis	125	TR 25	37.00	1626.49	1627.58	1627.58	1628.06	0.017350	3.06	12.08	12.54	1.00
Eje de Rio Oquis	100	TR 25	37.00	1626.17	1627.46	1627.15	1627.61	0.005338	1.70	21.72	24.10	0.57
Eje de Rio Oquis	75	TR 25	37.00	1625.97	1627.02	1627.02	1627.36	0.019082	2.58	14.32	21.47	1.01
Eje de Rio Oquis	50	TR 25	37.00	1624.74	1625.87	1626.12	1626.68	0.035772	3.99	9.34	12.49	1.41
Eje de Rio Oquis	25	TR 25	37.00	1623.75	1625.44	1624.72	1625.54	0.002028	1.35	27.37	20.10	0.37
Eje de Rio Oquis	0	TR 25	37.00	1624.00	1625.05	1625.05	1625.40	0.018592	2.60	14.28	22.04	1.00

Total flow in cross section.

3.5. Google Earth

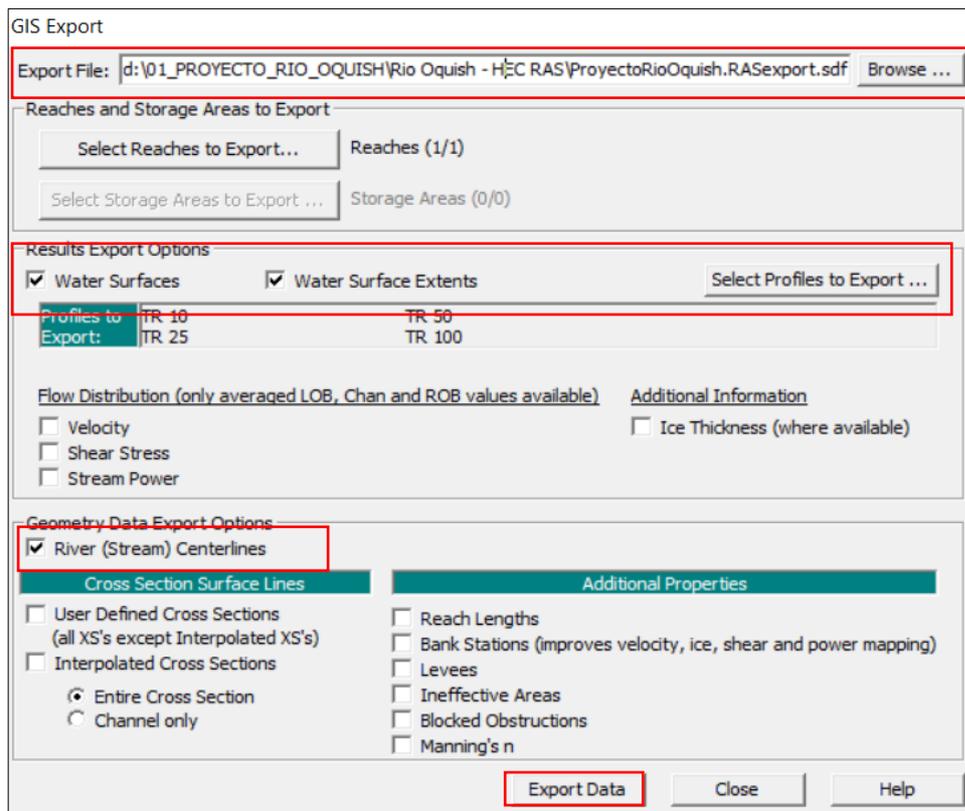
Con la simulación terminada en HEC- RAS, se procederá a exportar el modelo hidráulico al programa Google Earth para conseguir una visualización de la posible inundación en la zona de estudio.

Para todo este proceso se requiere de un programa auxiliar denominado Lamina, el cual genera un fichero de información GIS en el que muestra la línea de inundación que corresponde a los “**profiles**” definido previamente en HEC-RAS. En vista de ellos, se debe tener anticipadamente, el **programa Lamina** ya descargado.

1. En el programa HEC-RAS se va a **File/ Export GIS Data** generándose una ventana donde se selecciona primero la carpeta donde se guardará el archivo con extensión **.sdf**, lo siguiente es marcar las opciones de exportación tanto el **Water Surface**, **Water Surface Extents** y luego clic en **Select Profile to export** se selecciona los perfiles a exportar. Además, se debe asegurar que esté seleccionado la opción **River Centerlines** y se finaliza ejecutando **Export Data**.

Figura 83

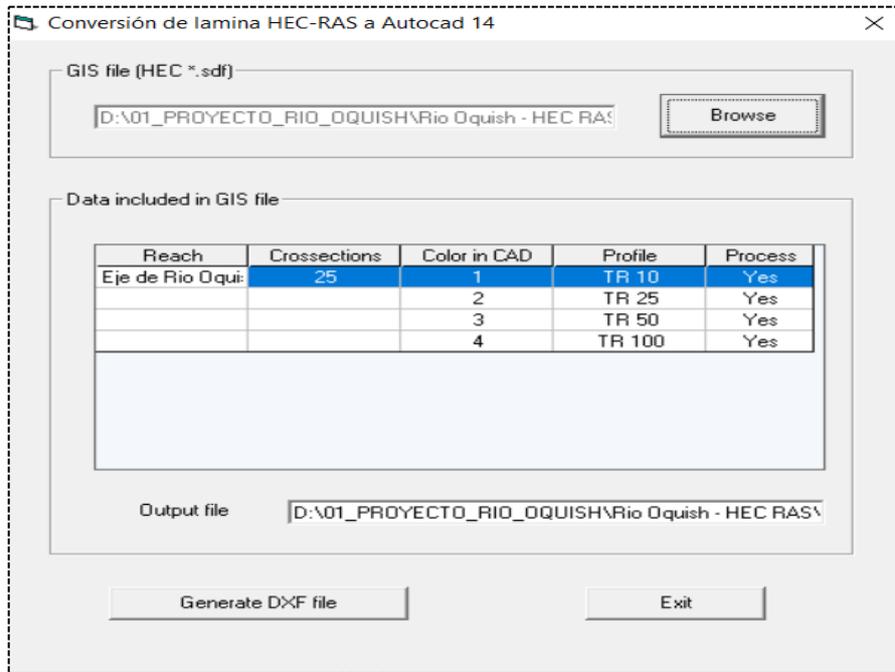
Ventana Gis Data



2. Al ejecutar el programa **Lamina.exe** automáticamente se muestra una ventana principal y en la opción de **Gis File** se busca el archivo que se exportó y para finalizar clic en **Generate DXF file**.

Figura 84

Ventana de conversión de Lamina HEC-RAS

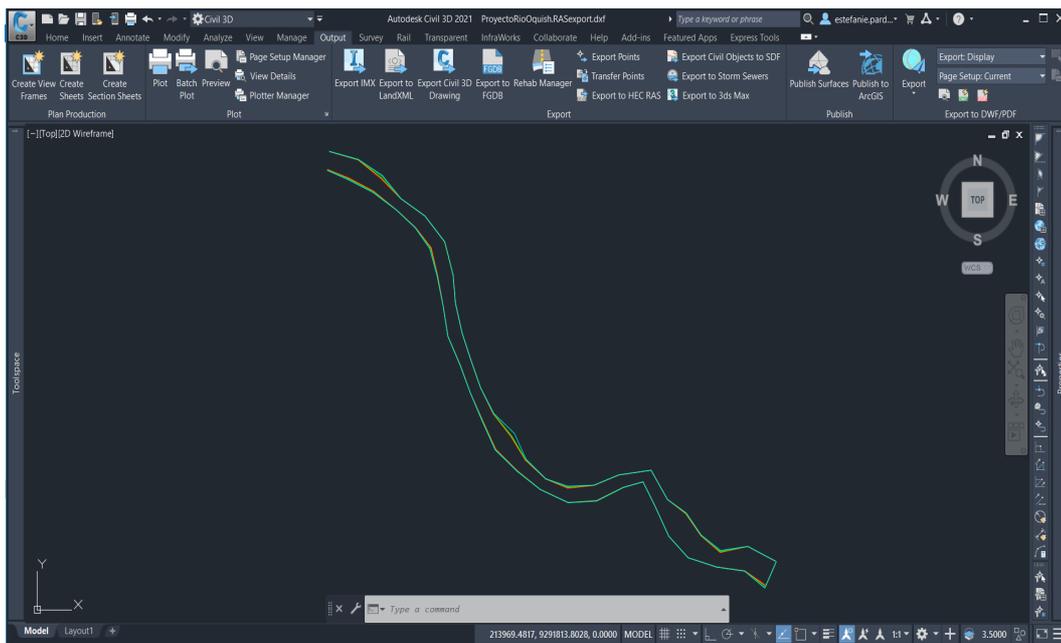


Nota. El archivo exportado estará en formato .sdf luego de ello, podemos usar el Software Autocad o Civil 3D para obtener los perfiles por período de retorno.

3. Se procede a ejecutar el programa Civil 3D y abrimos el archivo.sdf.

Figura 85

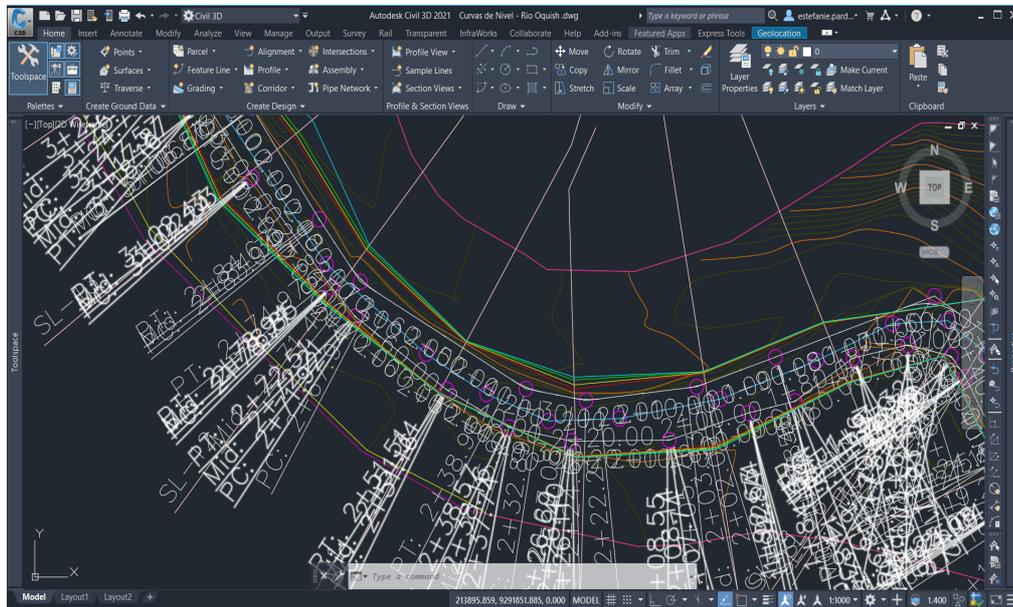
Lámina exportada del programa HEC-RAS



- Debido a que estas láminas no tienen el mismo sistema de unidades, se procede a copiarlas al proyecto que previamente fue trabajado. Para trasladar estas unidades, se hace clic derecho en **Clipboard/Paste to Original Coordinates**.

Figura 86

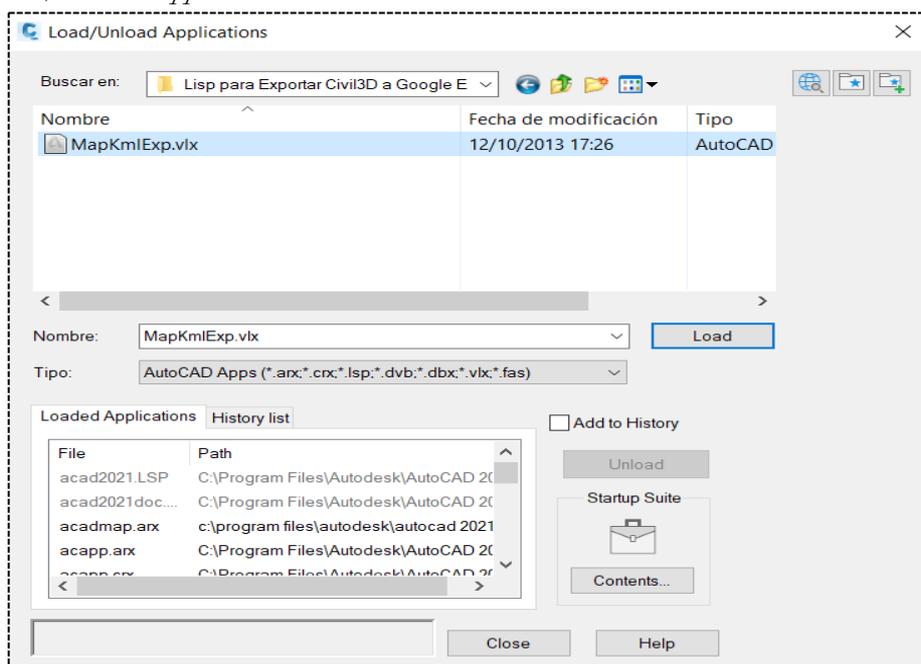
Ventana de las láminas con sistema de unidades métricas



- Luego de ello, se hará uso de un programa complementario denominado **Mapkmlxp**, que es un Lisp que permite exportar a **Google Earth**. Se ejecuta mediante el comando **Ap(Appload)**. Se finaliza haciendo clic en **Load** y se termina pulsando **close**.

Figura 87

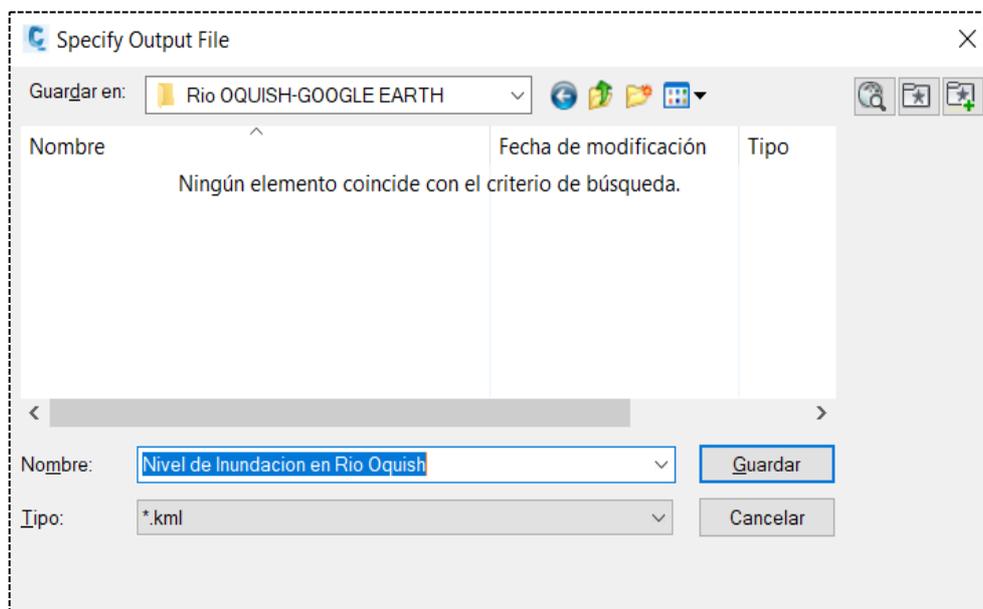
Ventana Load/Unload Applications



6. En Civil 3D, se emplea el comando **KMLOUT**, luego se seleccionan los tres perfiles exportados y Enter. Se muestra una ventana donde se escoge el directorio para guardar el archivo.

Figura 88

Ventana de salida



7. De manera automática se inicia el programa **Google Earth** y se muestran las láminas.

Figura 89

Láminas de agua en Google Earth



Nota. Tomado de Google Earth. (2020). *Mapa del río Quish. Creación de mapas.*
<https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>

Figura 90

Tirantes de profundidad de los períodos de retorno



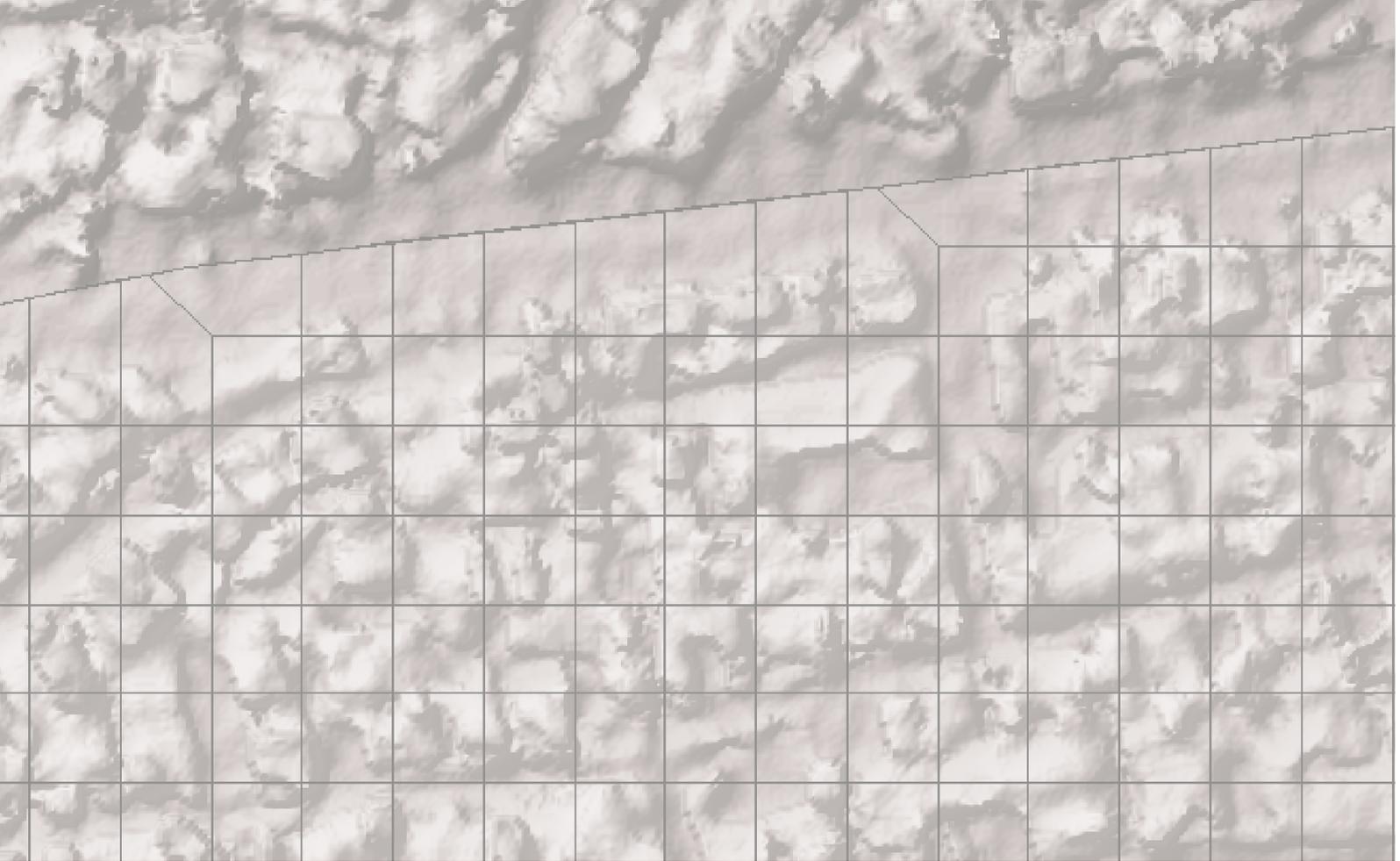
Nota. Tomado de Google Earth. (2020). *Mapa del río Quish. Creación de mapas.* <https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0> (Google Earth, 2020)

Para tener mayor detalle de la inundación se exporta desde ArcGIS el tirante de profundidad.

Referencias

- ADRC. (2019). *Natural Disaster Data Book 2019 An Analytical Overview Asian Disaster Reduction Center*. Asian Disaster Reduction Center. http://www.adrc.asia/publications/databook/DB2013_e.html
- Aerts, J. C. J. H., & Botzen, W. J. W. (2011). Climate change impacts on pricing long-term flood insurance: A comprehensive study for the Netherlands. *Global Environmental Change*, 21(3), 1045-1060. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.005>
- Ahmed Hamad, K. M. (2008). *Aplicaciones del modelo Hec-Ras para el análisis del flujo no permanente con superficie libre*.
- Barnes, H. H. (1967). *Roughness characteristics of natural channels*. U.S. Geological Survey Water - Supply Paper 1849.
- Bladé, E., Sánchez-Juny, H., Sánchez, P., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC-RAS*. Edicions UPC.
- Brunner, G., & Ceiw-Hec. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: User Manual 1D and 2D Version 5.0 (5.0)*. US Army Corps of Engineers. www.hec.usace.army.mil
- Chow, V. Te. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Editorial McGraw-Hill.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Editorial McGraw-Hill.
- Cowan, W. L. (1956). Estimating Hydraulic Roughness Coefficients. *Agricultural Engineering*, 37(7), 473-475.
- Das, T., Maurer, E. P., Pierce, D. W., Dettinger, M. D., & Cayan, D. R. (2013). Increases in flood magnitudes in California under warming climates. *Journal of Hydrology*, 501, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.042>
- Esarte, A. (2020). *Civil 3D, de Autodesk ¿qué es civil 3D?* Espacio BIM. <https://www.espaciobim.com/civil-3d>
- GEASIG. (2016). *¿Qué es HEC-RAS y para qué sirve? Especialistas en SIG y Medio Ambiente*. <https://www.geasig.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>

- Ghimire, R., Ferreira, S., & Dorfman, J. H. (2015). Flood-induced displacement and civil conflict. *World Development*, 66, 614-628. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.09.021>
- Google Earth. (2020). *Mapa del río Quish. Creación de mapas.* <https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>
- Materón Muñoz, H., García Vélez, J. L., Arango I., D., & Parra C., D. F. (2006). Modelación hidrológica e hidráulica aplicada a estudios de inundabilidad en cauces naturales caso de estudio: Urbanización río Nima. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (5), 27-38.
- Mejía M, J. A. (2006). *Hidrología aplicada*. UNALM.
- Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *Ribagua*, 3(1), 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- Poff, N. L. (2018). Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world. *Freshwater Biology*, 63(8), 1011-1021. <https://doi.org/10.1111/fwb.13038>
- Uruguay Educa (2020). *Funcionalidad de Google Earth*. www.uruguayeduca.edu.uy
- US Army Corps of Engineers. (1986). *About HEC. HEC-RAS. Hydrologic Engineering Center.* <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>
- Villón Béjar, M. (2007). *Hidráulica de Canales*. (2.^a ed.). Editorial Vilón.
- Villón Béjar, M. (2014). *HEC-RAS: Ejemplos*. Editorial Tecnológica Costa Rica.
- Xue, B., Zhanga, H., Wang, Y., Tan, Z., Zhu, Y., & Shrestha, S. (2021). Modelización de la cantidad y calidad del agua para una cuenca llanura agrícola típica del norte de China mediante un modelo acoplado. *Science of The Total Environment*, 790. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148139>
- Zeiger, S. J., & Hubbard, J. A. (2021). Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations. *Journal of Environmental Management*, 285(February), 112125. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112125>

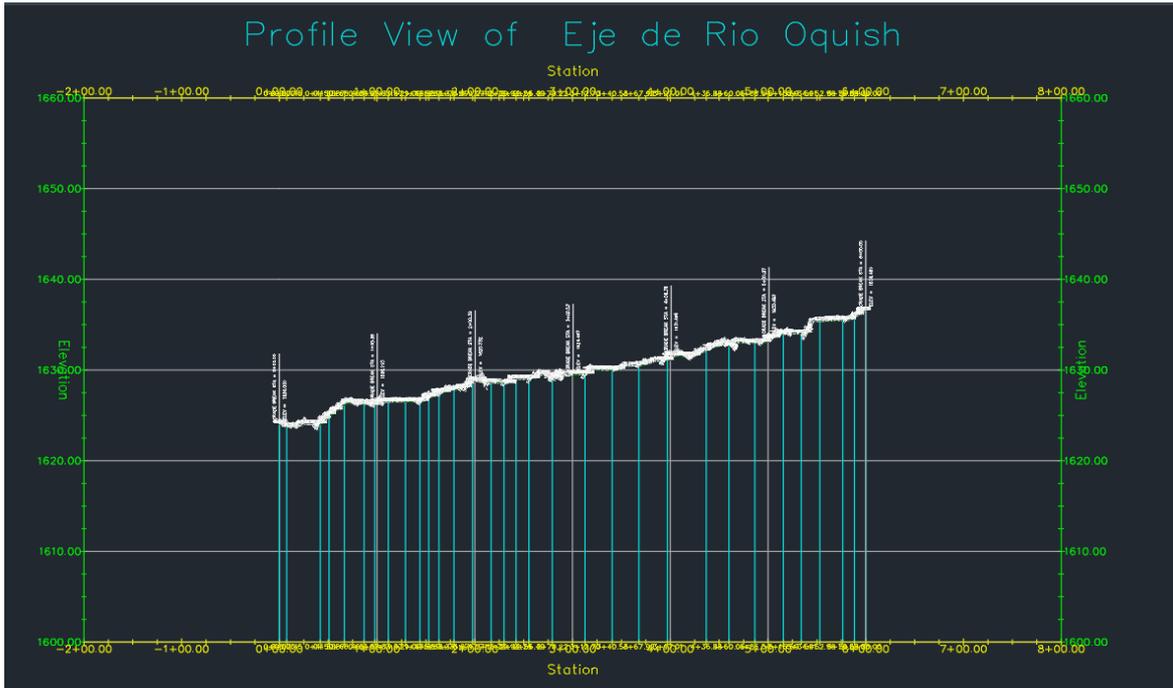


Anexos

ANEXOS

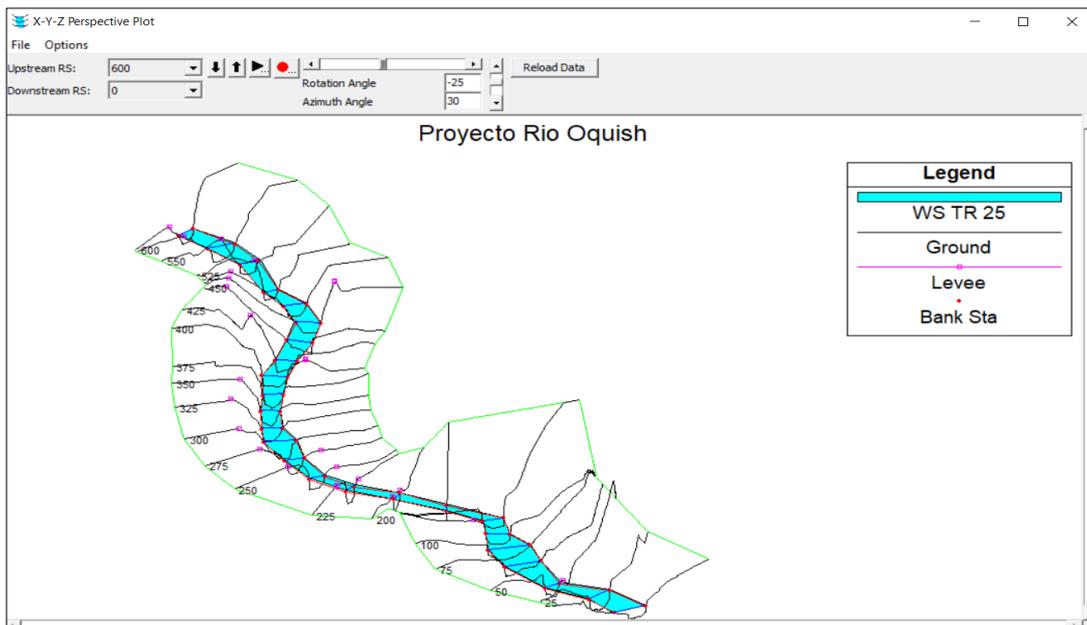
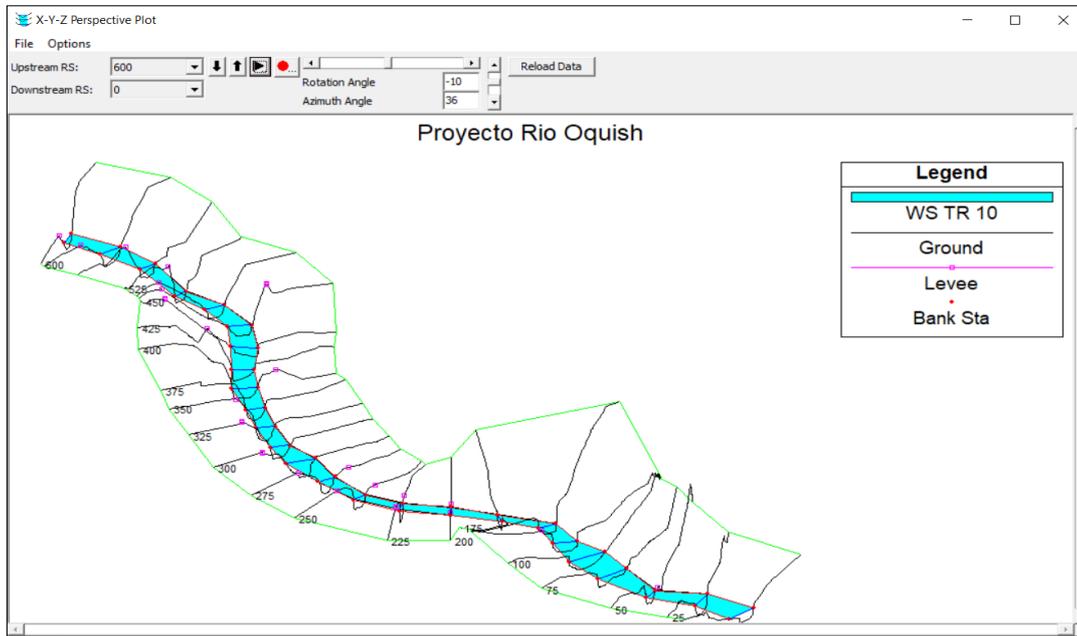
ANEXO 01

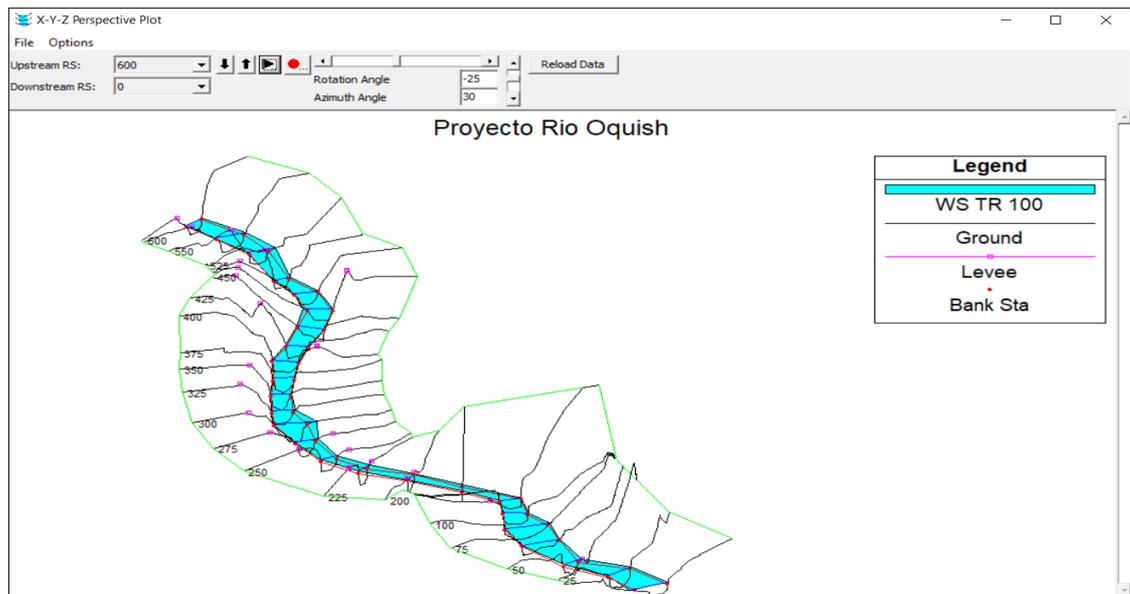
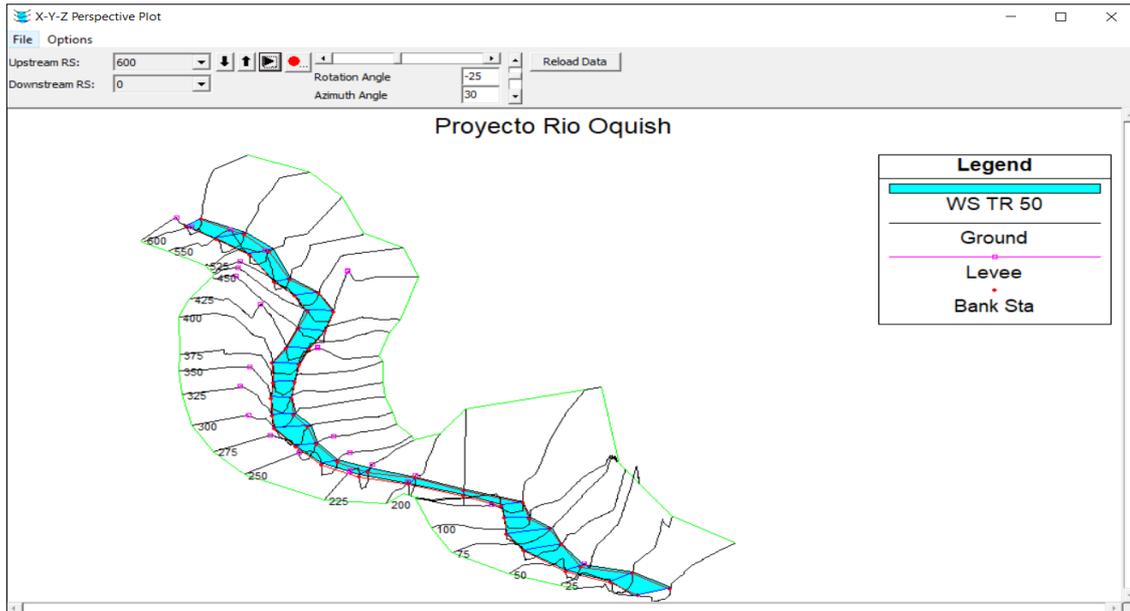
Vista de perfil en Civil 3D



ANEXO 02

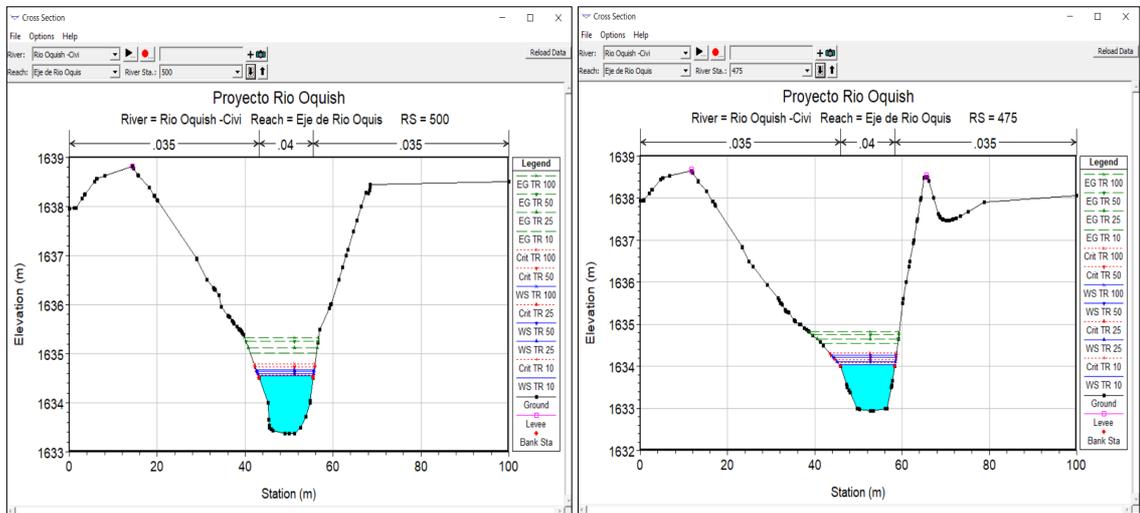
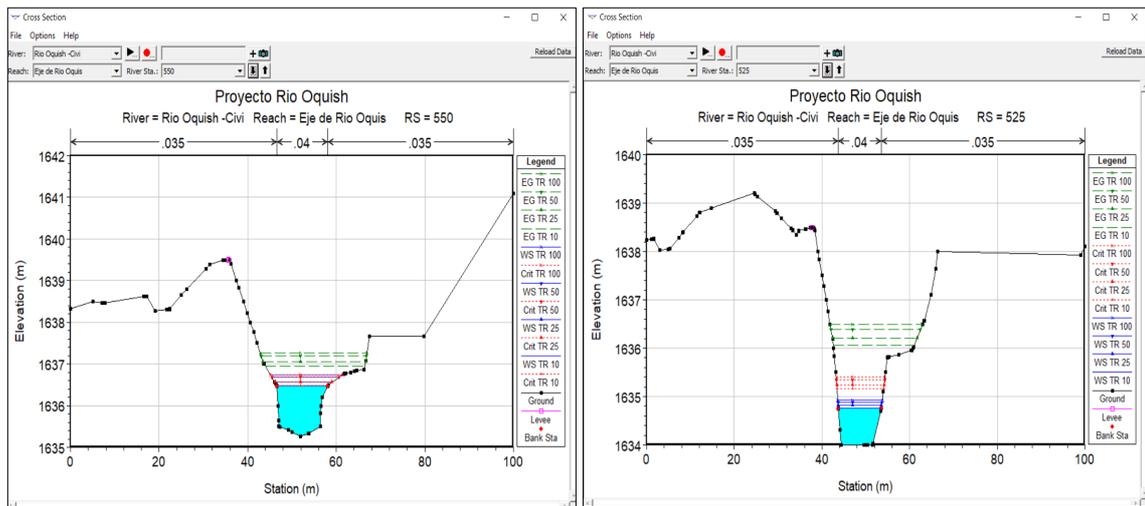
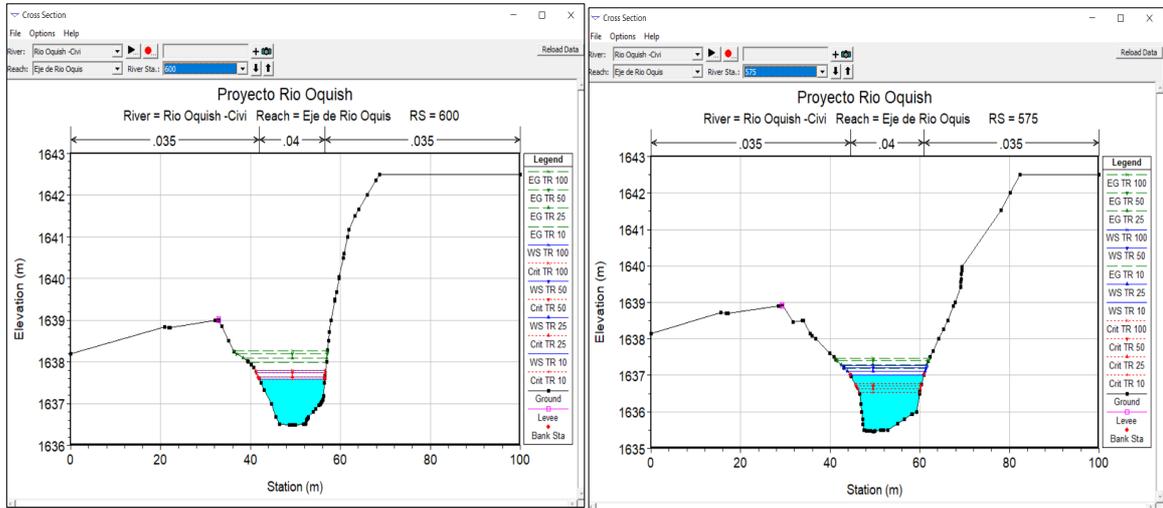
Perfil de flujo en perspectiva 3D para los períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años

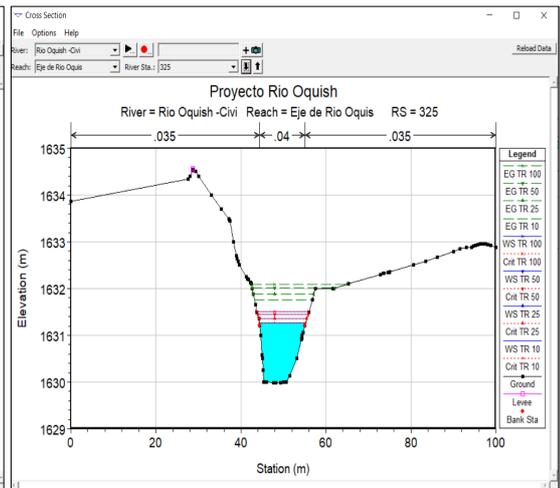
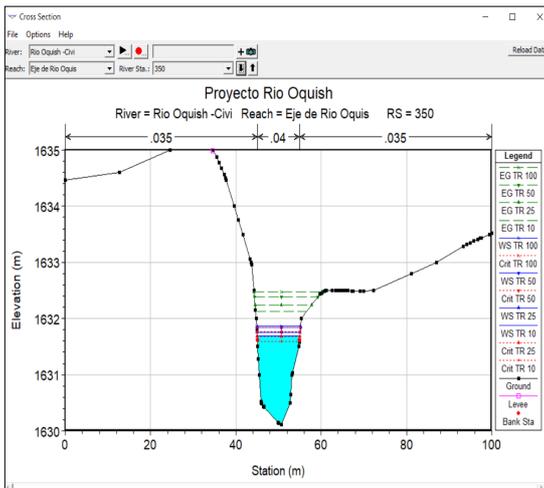
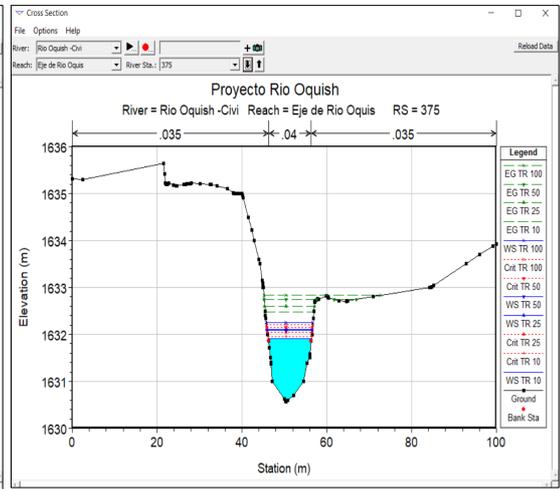
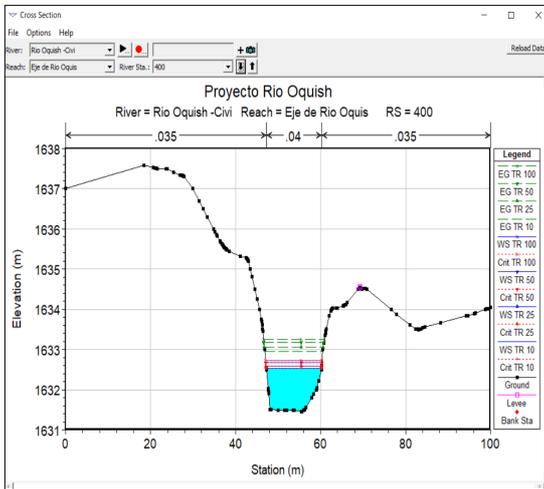
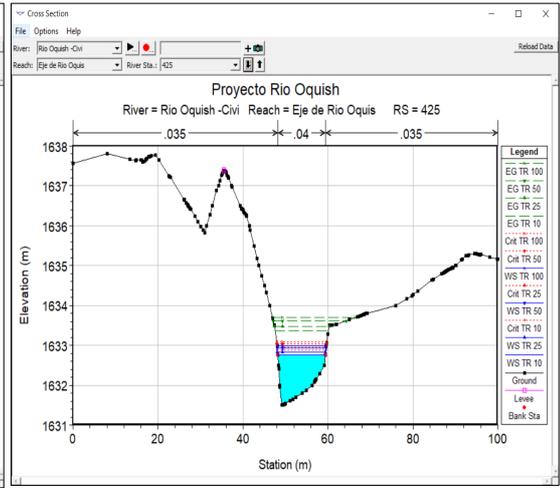
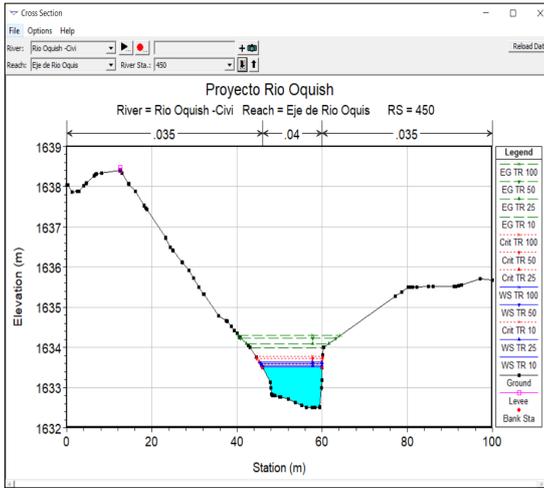


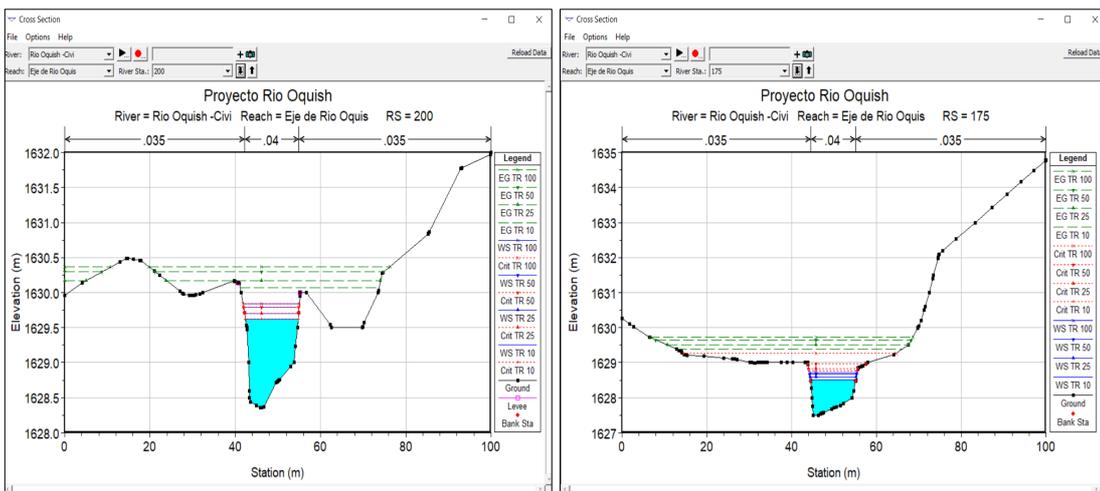
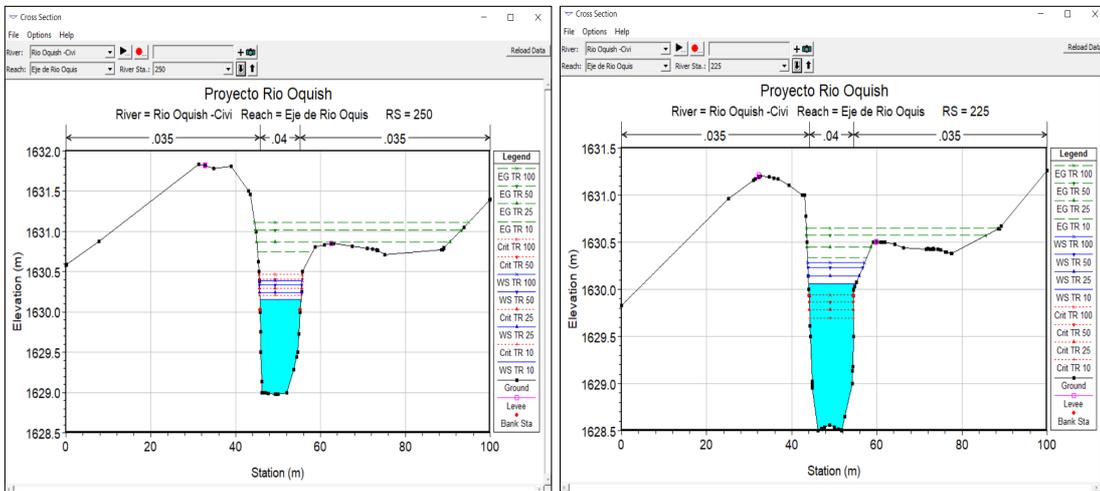
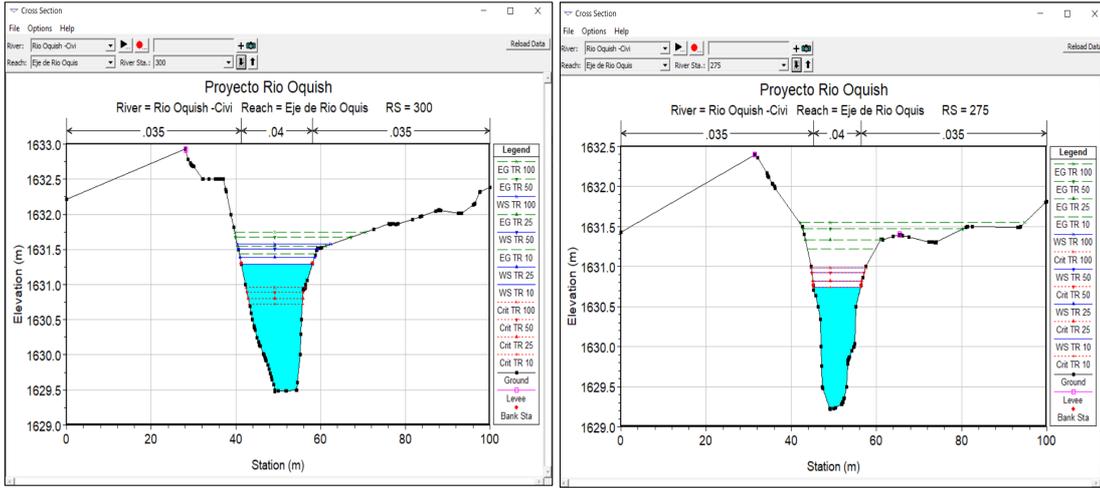


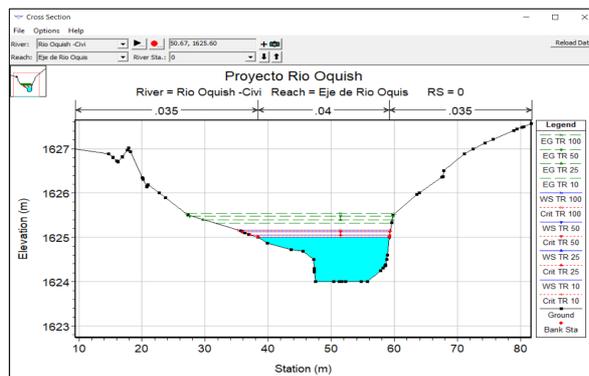
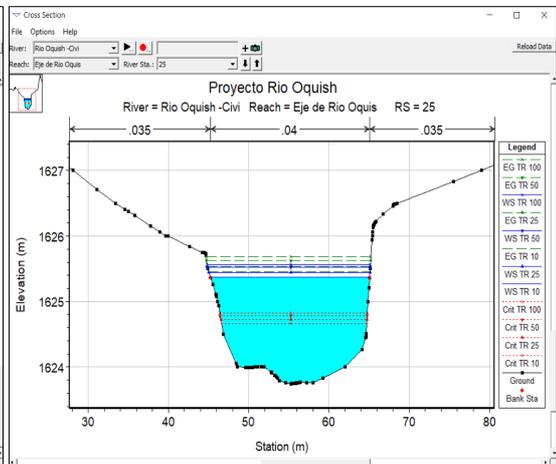
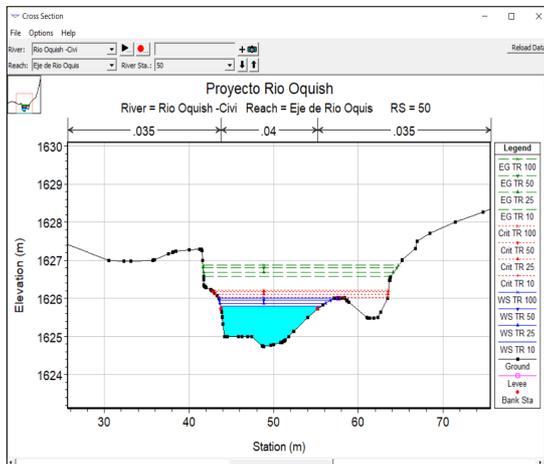
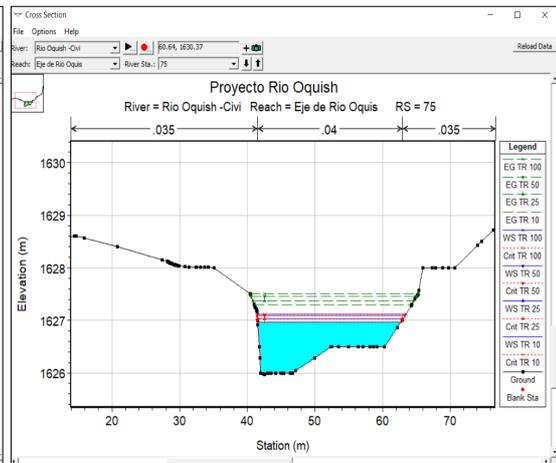
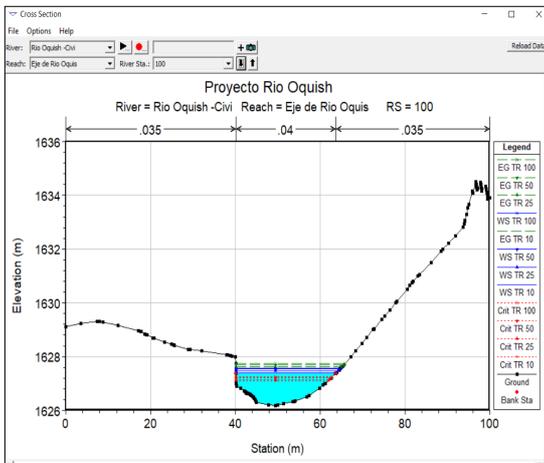
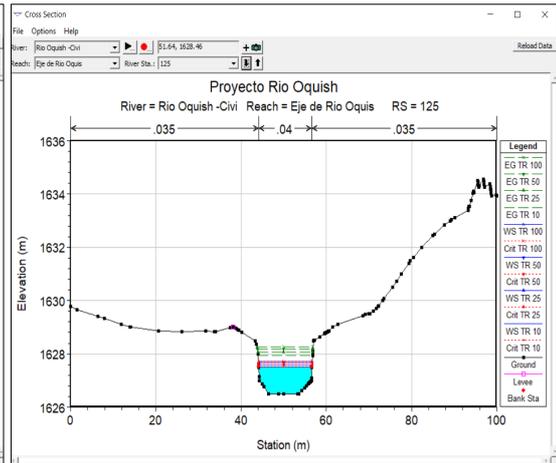
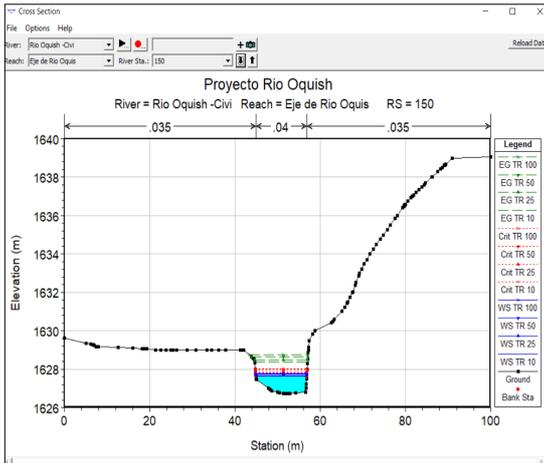
ANEXO 03

Secciones transversales del río Oquish



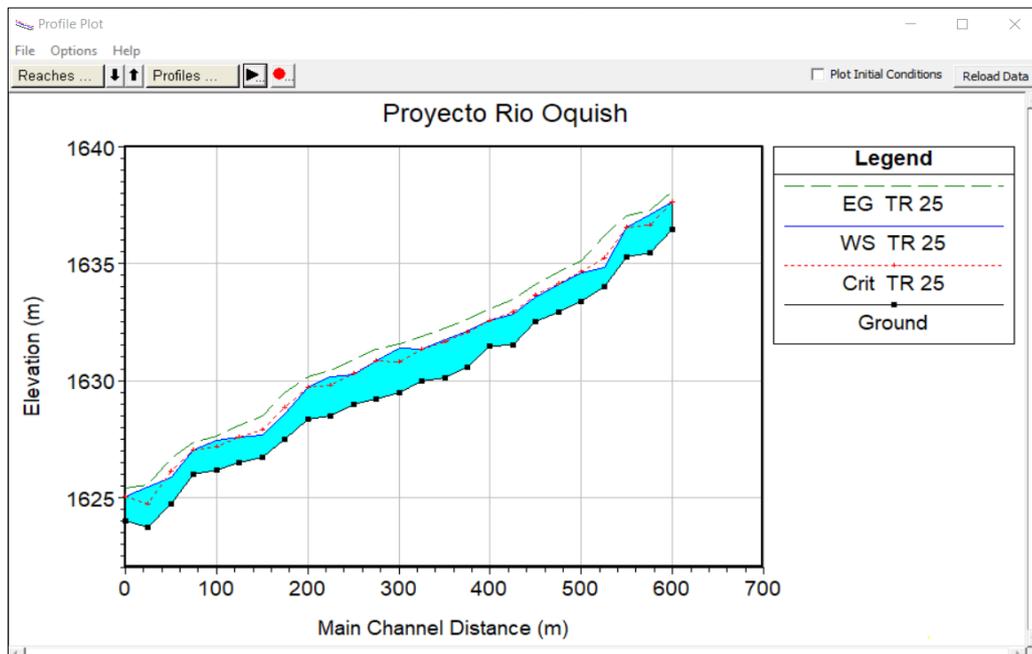
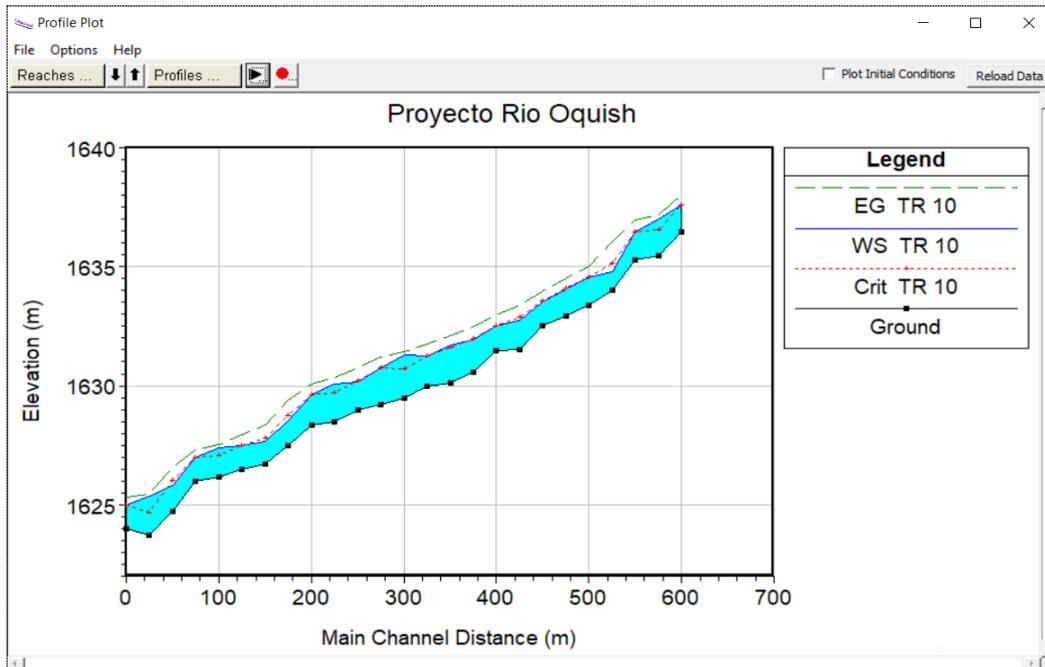


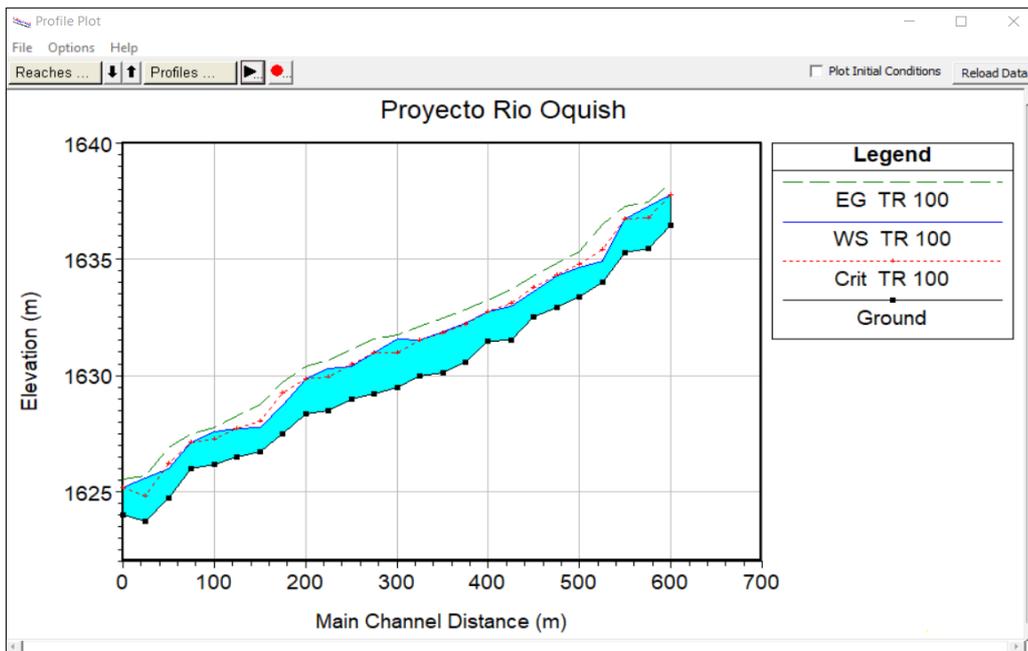
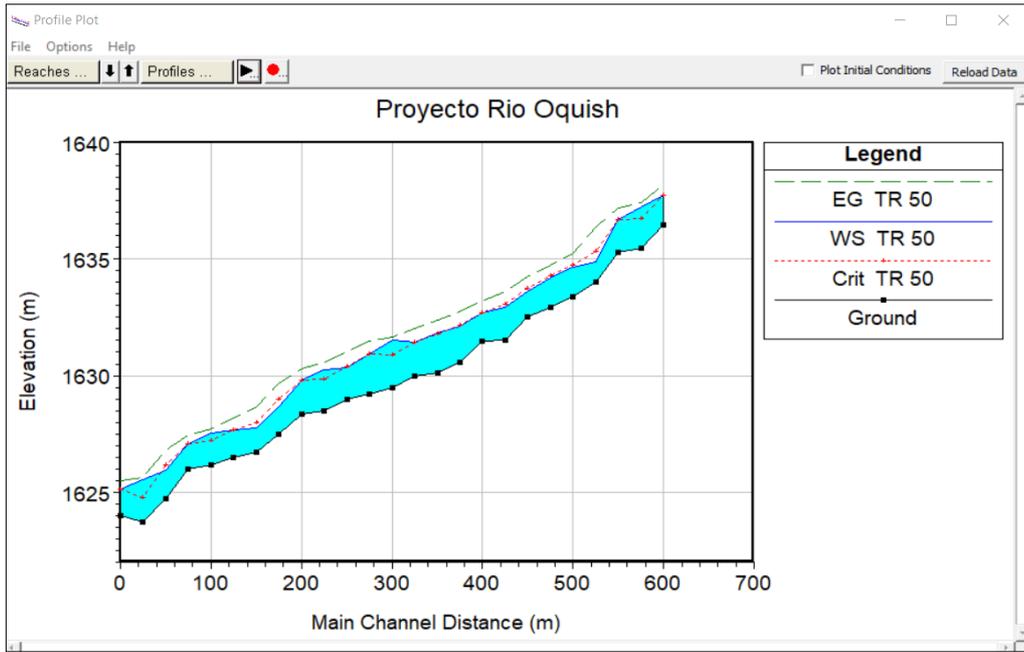




ANEXO 04

Perfiles longitudinales del río Oquish





CIDE
EDITORIAL

The logo for CIDE Editorial features a stylized graphic of an open book with its pages fanning out, positioned below the text.

ISBN: 978-9942-844-71-2



9789942844712