

Manual de laboratorio de simulación computacional

Práctica N°8: Simulación vertedero cresta ancha

Fuente del recurso: Ejemplo adaptado del video “*Tutorial 4 de HEC RAS: vertedero de cresta ancha*” desarrollado por el canal **ENG-School (2023)** , disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=M_tJsMtK9vY. Adaptado y aplicado al Laboratorio de Hidráulica de la **Universidad Industrial de Santander (UIS)** por los estudiantes Marlon Yadir Gonzalez Santos y Silvia Fernanda Jaimes Toloza, como práctica de simulación computacional.

Las guías de simulación desarrolladas en el presente trabajo se adaptaron del trabajo de grado de Malaver Nieto (2023), adaptando su metodología a las condiciones y objetivos del presente estudio.

1. Objetivos de la simulación

- ✓ Comprender los principios de funcionamiento hidráulico de los vertederos de cresta ancha y aplicar los pasos de modelación para representar esta estructura en un canal abierto utilizando el software HEC-RAS.
- ✓ Aplicar los datos geométricos (elevaciones, anchos) e hidrológicos (caudales, condiciones de contorno) para configurar el modelo de la estructura lineal en HEC-RAS, replicando el ejemplo orientador del video
- ✓ Evaluar y analizar los resultados de la simulación de flujo permanente (Steady flow analysis) en HEC-RAS, enfocándose en la interpretación de los perfiles de superficie de agua y las líneas de energía a lo largo del tramo del canal y sobre el vertedero.

2. Requerimientos para la Simulación

- ✓ Sistema operativo Windows 7 64-bit (o superior) o Linux
- ✓ Consultar y seguir el manual de instrucciones para la descarga e instalación del software HEC-RAS
- ✓ Preferiblemente poseer la versión 5.0.7 del programa HEC-RAS

3. Introducción

El presente laboratorio tiene como propósito comprender el comportamiento hidráulico del flujo en canales abiertos mediante la simulación computacional en el software HEC-RAS. En particular, se busca analizar el funcionamiento de un vertedero de cresta ancha, estructura fundamental para el control y medición del caudal.

A través del desarrollo de la práctica, el estudiante aplicará conceptos teóricos de la hidráulica, configurará los parámetros geométricos y de flujo dentro del entorno del programa, y evaluará los resultados obtenidos mediante la interpretación de perfiles de superficie, líneas de energía y distribución del flujo. Este proceso permitirá fortalecer las competencias técnicas en modelación hidráulica y afianzar la relación entre la teoría y la simulación aplicada a la ingeniería.

4. Marco teórico

Definición de vertedero

Un vertedero es un dique o pared que presenta una escotadura de forma regular, a través de la cual fluye una corriente líquida (ver *Figura 1*). Esta estructura intercepta la corriente, causando una elevación del nivel de aguas arriba, y se emplea para controlar niveles y/o para medir caudales (Marbello, 2005).

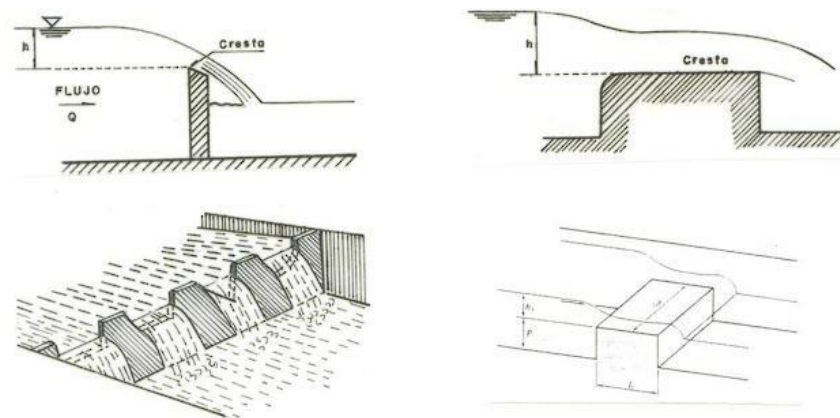


Figura 1 Flujo a través de vertederos (Marbello, 2005)

La arista más elevada del vertedero, que está en contacto con el agua, se llama cresta. La altura h de la lámina de fluido sobre la cresta, responsable de la descarga, se llama cabeza o carga del vertedero, como se puede observar en la *Figura 1* (Marbello, 2005).

La medición del flujo en un vertedero se basa en la fuerza de gravedad. Los vertederos de pared delgada, como aforadores, son ampliamente utilizados debido a su construcción sencilla y, sobre todo, a la facilidad para determinar con alta precisión el caudal del flujo en un canal a partir de la carga del vertedero, tal como se muestra en la *Figura 1* (Marbello, 2005).

Terminología relativa a los vertederos

A continuación, se muestran algunas partes clave en los vertederos y su denominación:

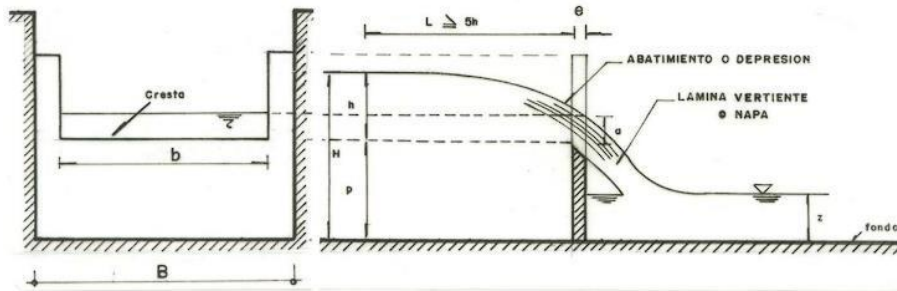


Figura 2 Terminología relativa al flujo en vertederos (Marbello, 2005)

Donde:

b: Longitud de la cresta del vertedero

B: Ancho del canal de acceso

h: Carga del vertedero. Siendo este el desnivel entre la superficie del agua y la cresta del vertedero

a: Carga sobre la cresta

P: Altura o cota de la cresta, referida al fondo del canal

z: Espesor de la lámina de agua, aguas abajo del vertedero

L: Distancia mínima, aguas arriba del vertedero, a la cual se coloca el medidor de niveles (Limnómetro). $L \geq 5h$

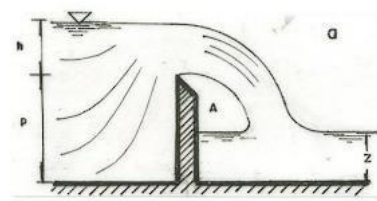
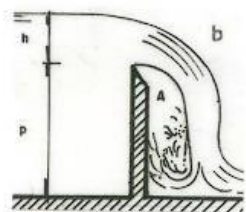
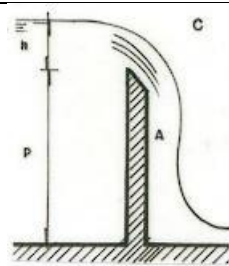
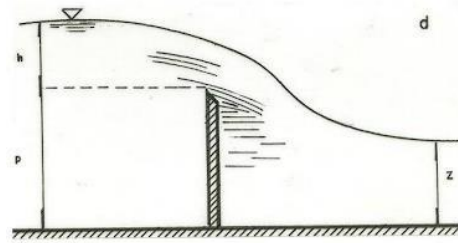
e: Espesor de la pared del vertedero

H: Espesor de la lámina de agua, aguas arriba del vertedero

El chorro descargado a través de la escotadura del vertedero, modelado por la cresta, forma una hoja llamada napa o lámina vertiente, como se muestra en la *Figura 2*. Como se verá posteriormente, el caudal, **Q**, descargado a través de un vertedero, se puede expresar en función exclusiva de la carga del vertedero, **h**, es decir, $Q = f(h)$ (Marbello, 2005).

Tipos de lámina vertiente

Cuando el aire atmosférico rodea externa y completamente a la lámina vertiente, y esta se despega totalmente de la cara de aguas abajo del vertedero, se dice que es de lámina vertiente, como se muestra en la *Figura 1*. Esta forma de lámina corresponde al régimen más estable y, por lo tanto, es la más deseable en el empleo de los vertederos de pared delgada como medidores de caudal. En el caso de un vertedero rectangular, sin contracciones laterales, esto es, con longitud de cresta igual al ancho de plantilla del canal de acceso, el espacio situado bajo la lámina de agua estará incomunicado con la atmósfera exterior, y el escurrimiento puede tomar una de las siguientes formas:

Tipo de Lámina	Descripción	Figura
Lámina Libre	Se obtiene mediante la instalación de orificios de ventilación en las paredes del canal, inmediatamente aguas abajo del vertedero.	
Lámina Abatida	Ocurre cuando la ventilación de la descarga es insuficiente, por lo cual se introduce aire en la parte inferior de dicha lámina.	
Lámina Adherente	Es el caso de menor aireación de la lámina vertiente; es decir, la ventilación por debajo de la lámina es nula.	
Lámina Ahogada Inferiormemente (Caso 1)	Ocurre al aumentar la carga de un vertedero de lámina adherente, sin que el aire pueda entrar debajo del manto inferior de la lámina.	

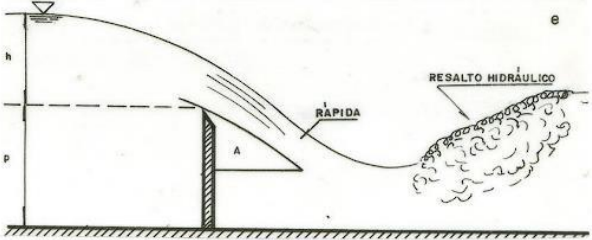
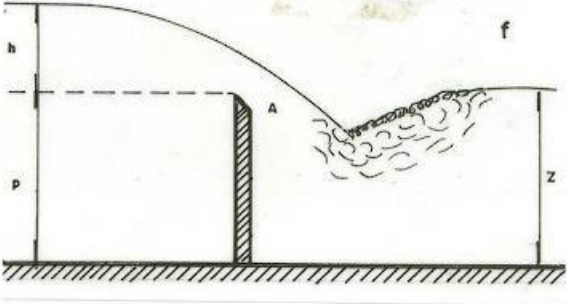
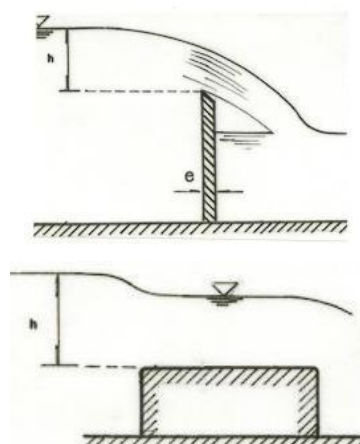
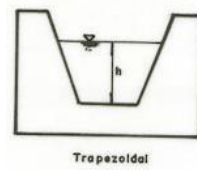
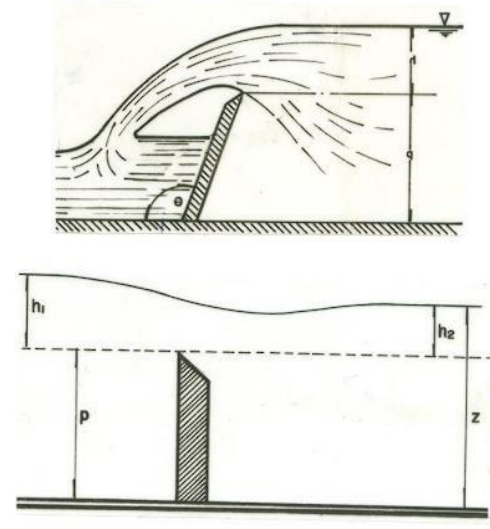
<p>Lámina Ahogada Inferiormente (Caso 2)</p>	<p>Cuando, en un vertedero de lámina libre, la carga es bastante grande se produce una rápida al pie de la placa del vertedero; posteriormente, un poco aguas abajo, el flujo adquiere su velocidad normal y, dadas las condiciones de régimen subcrítico aguas abajo, se forma un resalto hidráulico.</p>	
<p>Lámina Ahogada Superiormente</p>	<p>Se presenta cuando el resalto hidráulico se acerca al vertedero cubriendo el pie de la lámina vertiente. En este caso, por ser constante el caudal aguas arriba del vertedero, toda variación en el nivel de aguas abajo repercute en el nivel aguas arriba.</p>	

Tabla 1 Tipos de láminas (Marbello, 2005)

Clasificación de los vertederos

En la siguiente tabla se muestran algunos tipos de vertederos:

Clasificación	Descripción	Representación
Según el espesor de la pared	<ul style="list-style-type: none"> -Vertederos de pared delgada ($e/h < 0.67$) -Vertederos de pared gruesa o cresta ancha ($e/h \geq 0.67$) 	
Según su forma geométrica	<ul style="list-style-type: none"> -Rectangulares -Triangulares -Trapezoidales -Circulares 	
Según la altura de la lámina de agua, aguas abajo	<ul style="list-style-type: none"> -Vertederos de descarga libre -Vertederos sumergidos o ahogados 	

Según la longitud de la cresta	<ul style="list-style-type: none"> - Vertederos sin contracciones laterales ($b=B$) - Vertederos con contracciones laterales ($b<B$) 	
Según la posición del plano del vertedero con respecto a la dirección de la corriente	<ul style="list-style-type: none"> - Vertederos transversales o normales - Vertederos laterales (Aliviaderos) - Vertederos oblicuos - Vertedero de aducción radial o de pozo 	

Tabla 2 Clasificación de los vertederos (Marbello, 2005)

Vertedero de cresta ancha

Para un vertedero de cresta ancha (figura 6.21), donde $b/h \geq 10$ la fórmula para el cálculo del caudal es:

$$Q = 1.45Lh^{\frac{3}{2}}$$

donde:

- Q: caudal, en m^3/s
- L: ancho de cresta, en m

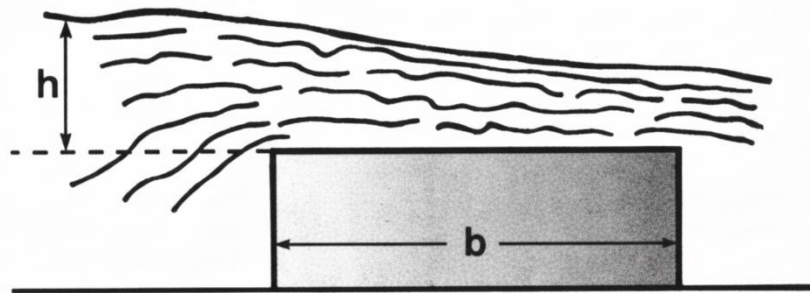


Figura 3. Vertedero cresta ancha (Villón, 1995)

5. Implementación de la Simulación

5.1. Descripción del problema

Se solicita realizar la modelación hidráulica de un canal prismático de 1000 m de longitud y 80 m de ancho de base, con una pendiente longitudinal de 0.001 y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. El canal presenta una elevación de fondo de 10 m en la sección aguas abajo (estación 0) y de 11 m en la sección aguas arriba (estación 1000), incorporando secciones transversales interpoladas cada 100 m para garantizar la continuidad geométrica del modelo. Dentro del tramo se incluye un vertedero de cresta ancha ubicado en la estación 490, con una elevación de cresta de 13 m y un ancho de cresta de 15 m, localizado a 10 m de la sección aguas arriba.

La simulación debe realizarse en el software HEC-RAS mediante un análisis de flujo permanente, considerando cinco perfiles de caudal de 50, 100, 150, 200 y 250 m³/s. Como condiciones de contorno, se empleará el método de tirante normal con una pendiente de 0.001 tanto en aguas arriba como en aguas abajo. Como resultados esperados, se debe obtener el perfil longitudinal del flujo mostrando la línea de energía y la superficie del agua para cada caudal, una tabla con el número de Froude, la velocidad del flujo y la elevación de la superficie del agua en la sección del vertedero, así como una visualización tridimensional del comportamiento del flujo sobre la estructura.

5.2. Pasos de la simulación

1. Crear Nuevo Proyecto

Ir a File → New Project. Asignar un nombre y seleccionar la carpeta de destino.

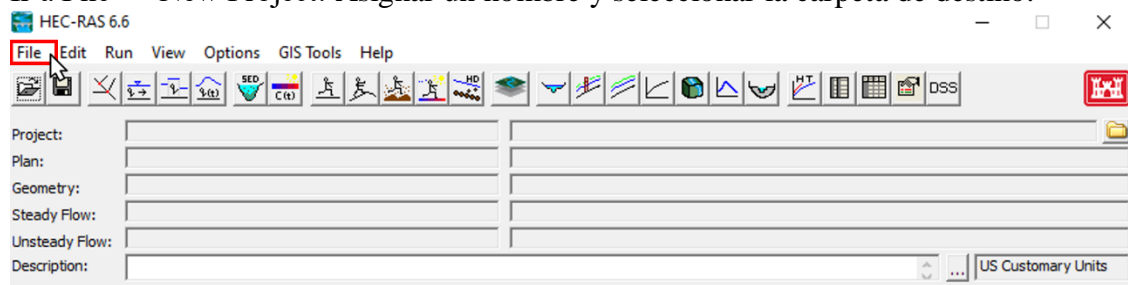


Figura 4. nombre y carpeta de destino

2. Seleccionar Unidades

Ir a Options → Unit System y seleccionar Metric System (Sistema Métrico).

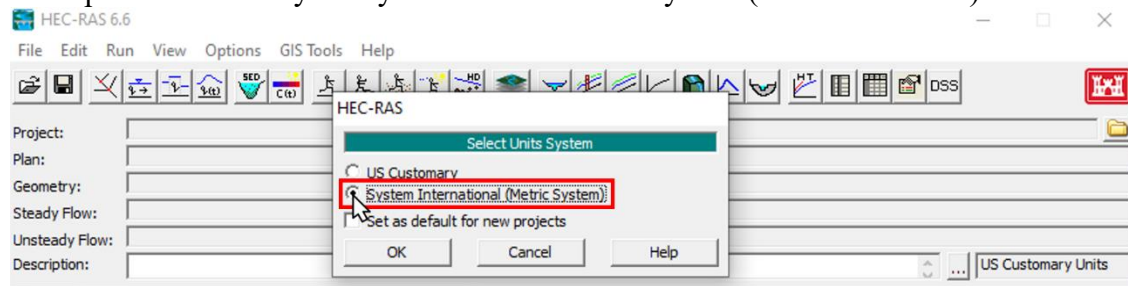


Figura 5. Sistema Métrico

3. Crear Geometría.

Abrir el editor de Geometría (Edit → Geometric Data).

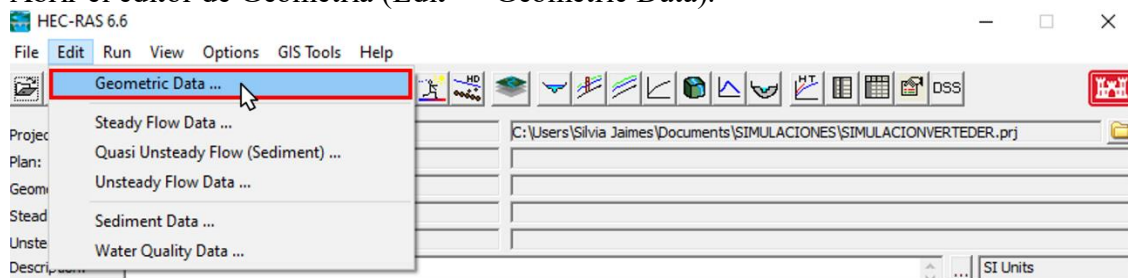


Figura 6. Editor de Geometría

4. Dibujar Río y Tramo

Hacer doble clic en el lienzo para crear un río y un tramo (ejemplo: River 1, Reach 1).

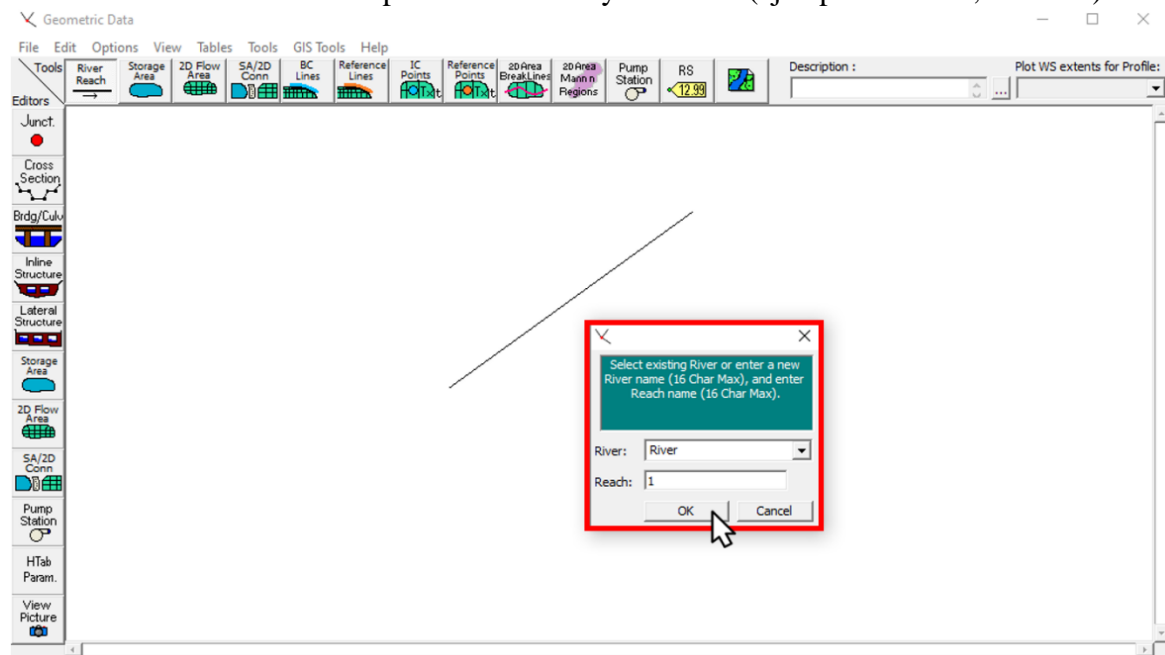


Figura 7. Un río y un tramo

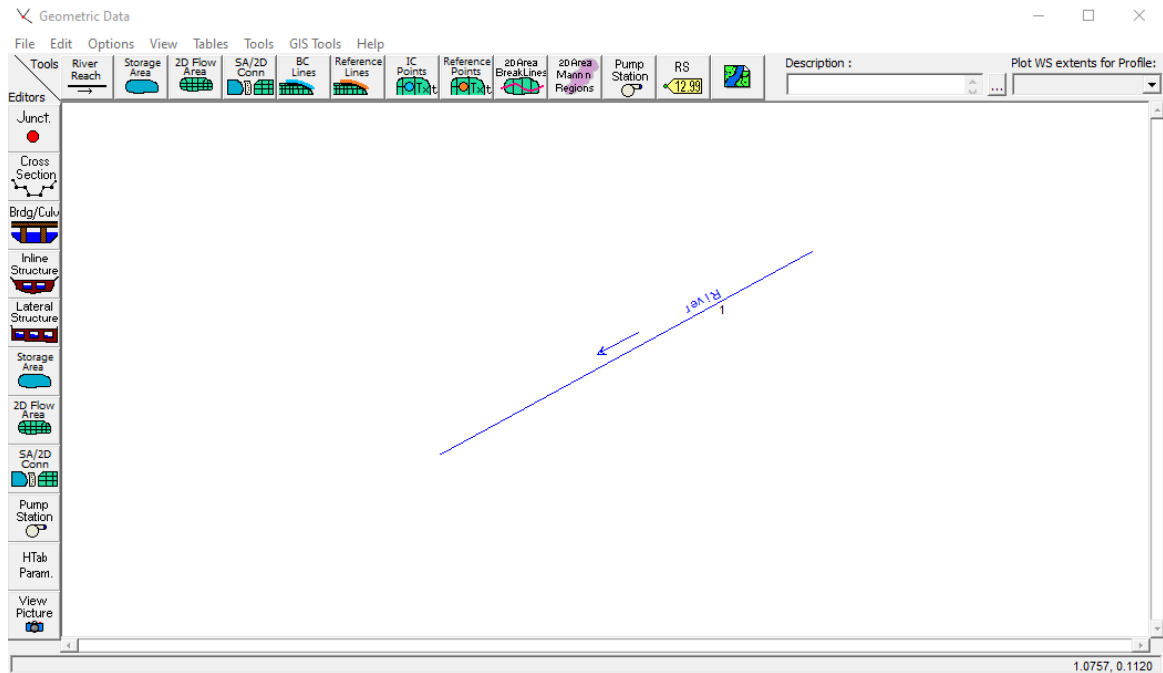


Figura 8. River 1, Reach 1

DEFINICIÓN DE ST

5. Agregar Sección Inicial (Estación 0)

Abrir el editor de Secciones Transversales. Ir a Options → Add a New Cross Section. Asignar la estación 0.

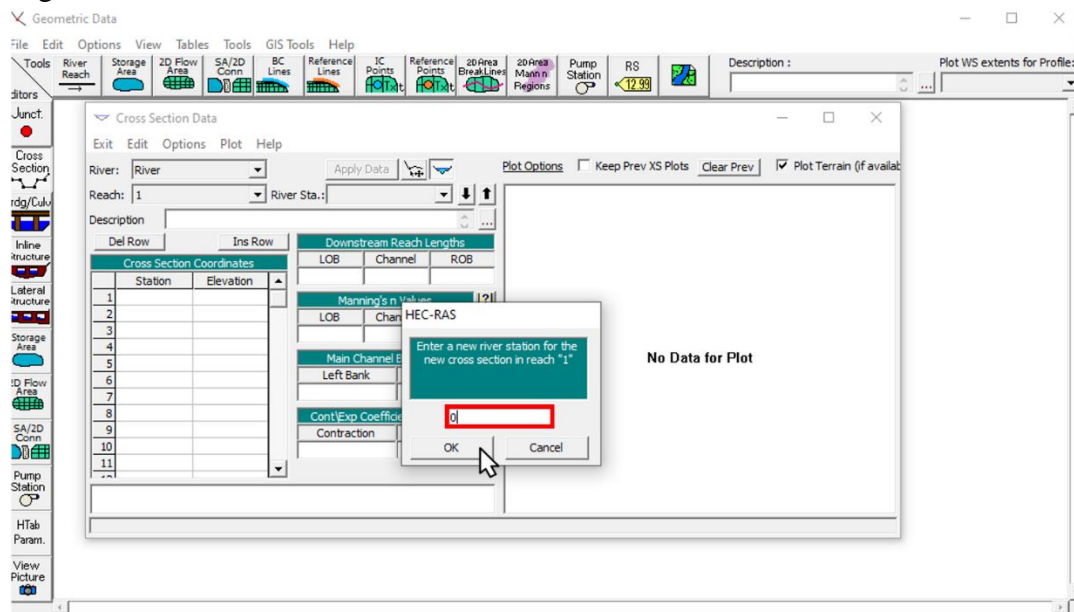


Figura 9. Estación 0.

6. Introducir Coordenadas (X, Y)
Ingresar los puntos de la sección (ejemplo: (0, 15), (10, 10), (90, 10), (100, 15))

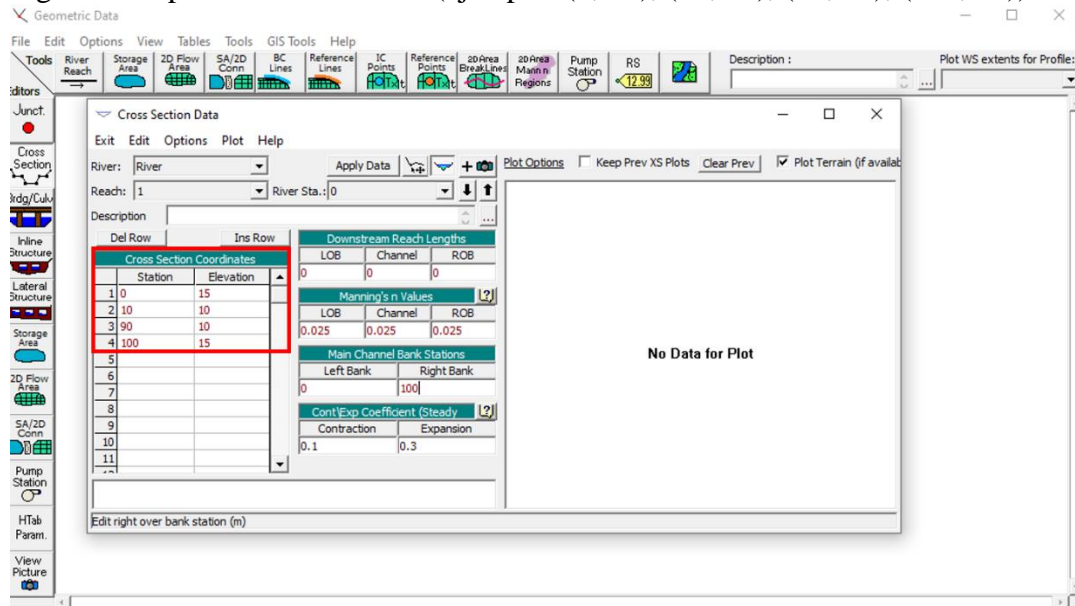


Figura 10. Puntos de la sección

7. Introducir Manning 'n'
En Manning's n Values, ingresar 0.025 para los tres segmentos. Clic en Apply Data.

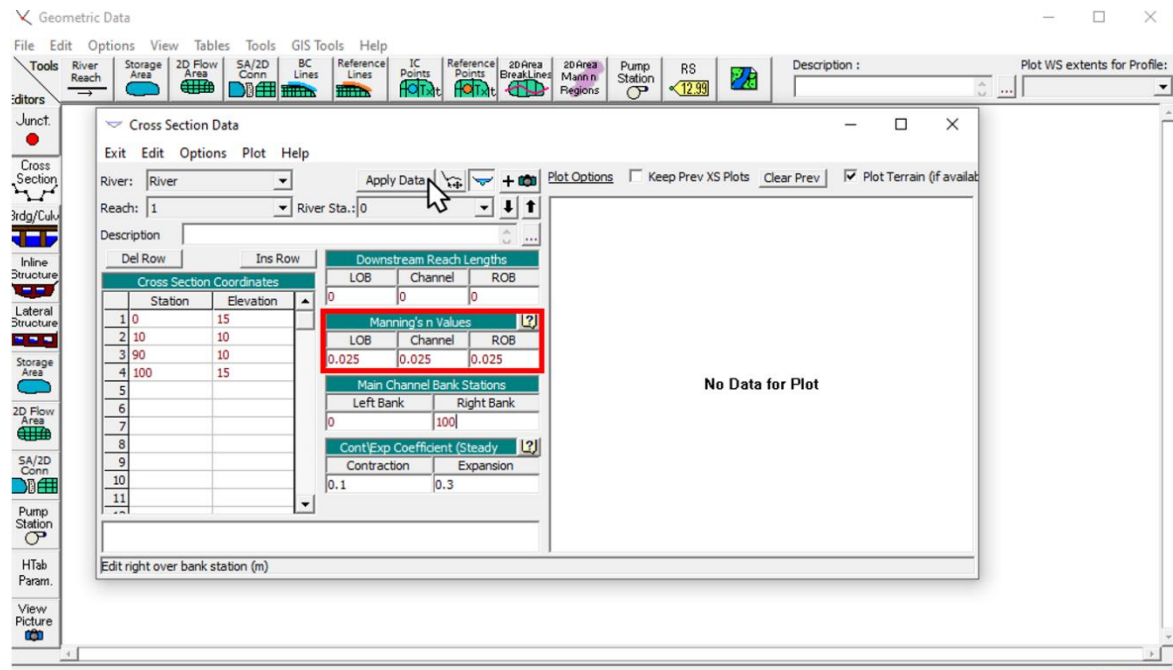


Figura 11. 0.025 para los tres segmentos

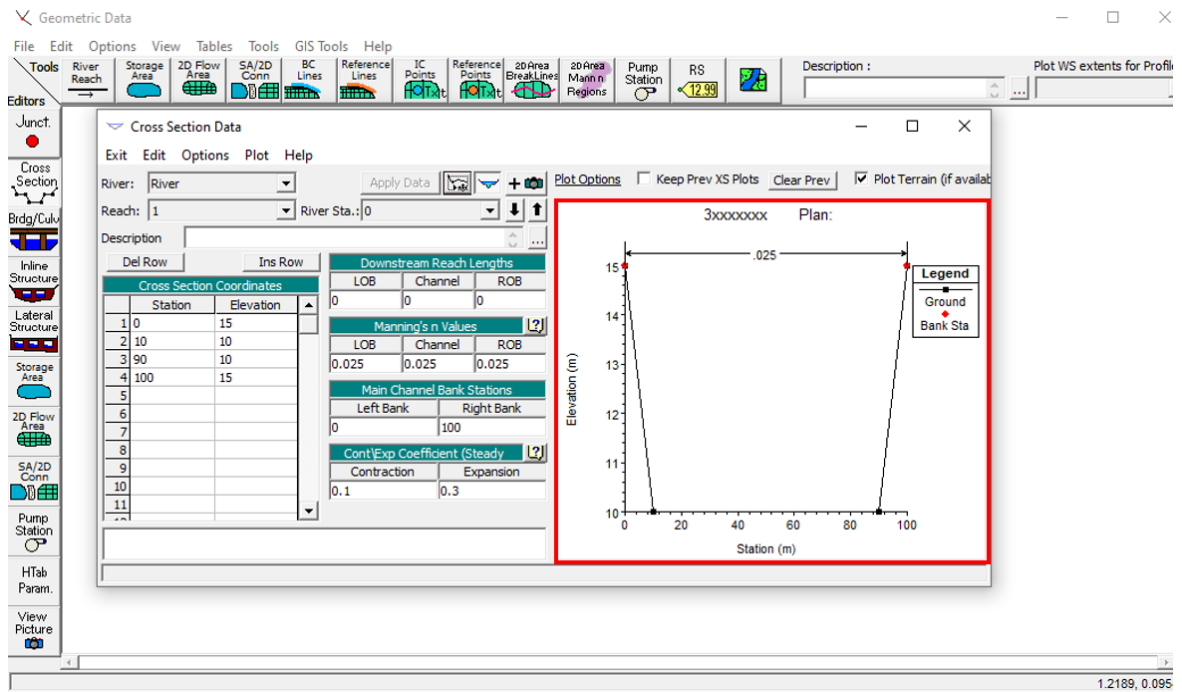


Figura 12.

8. Copiar Sección Transversal

Ir a Options → Copy Current Cross Section. Nombrar la nueva estación 1000.

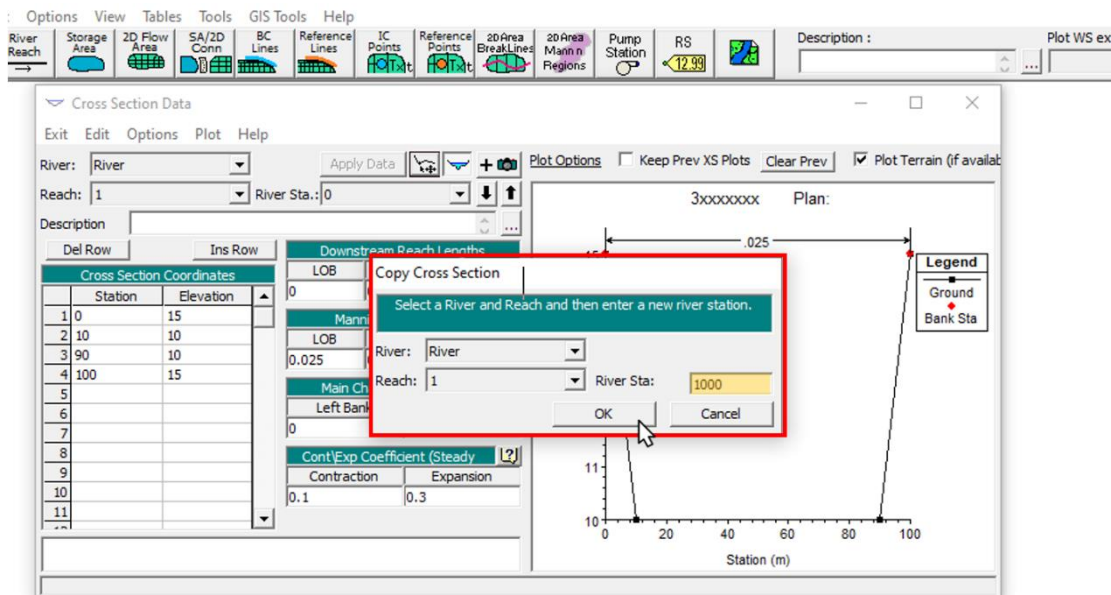


Figura 13. Las longitudes de los tres segmentos a 1000 metros.

9. Asignar Longitudes

En Reach Lengths, establecer las longitudes de los tres segmentos a 1000 metros.

10. Ajustar Elevación por Pendiente

Ir a Options → Adjust Elevations. Sumar 1 M a la elevación (siguiendo el video). Clic en Apply Data.

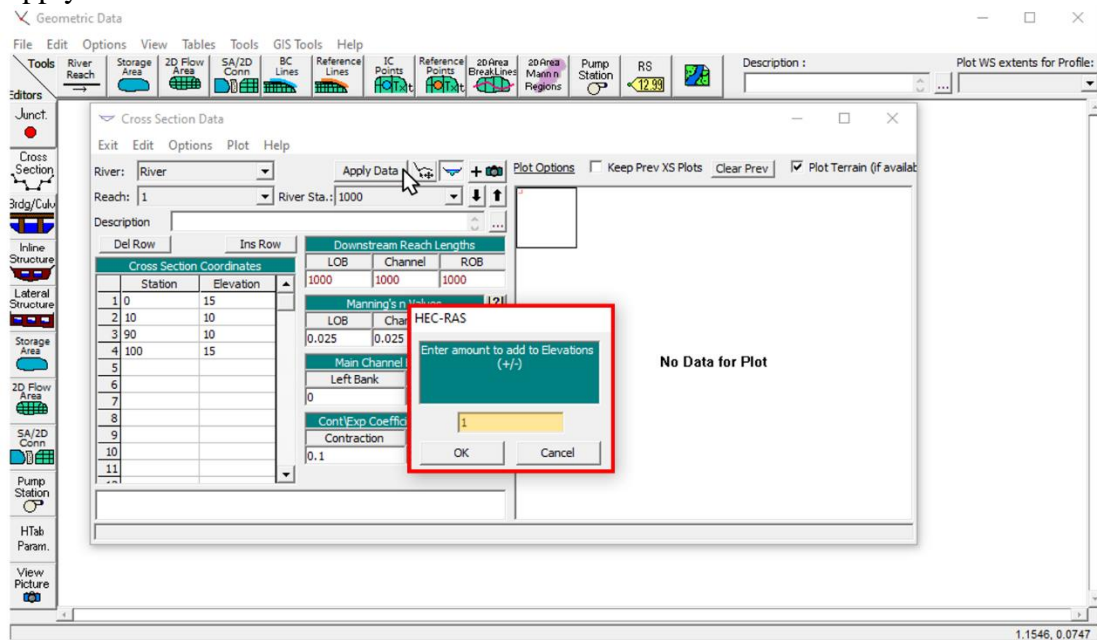


Figura 14. Sumar 1 M a la elevación

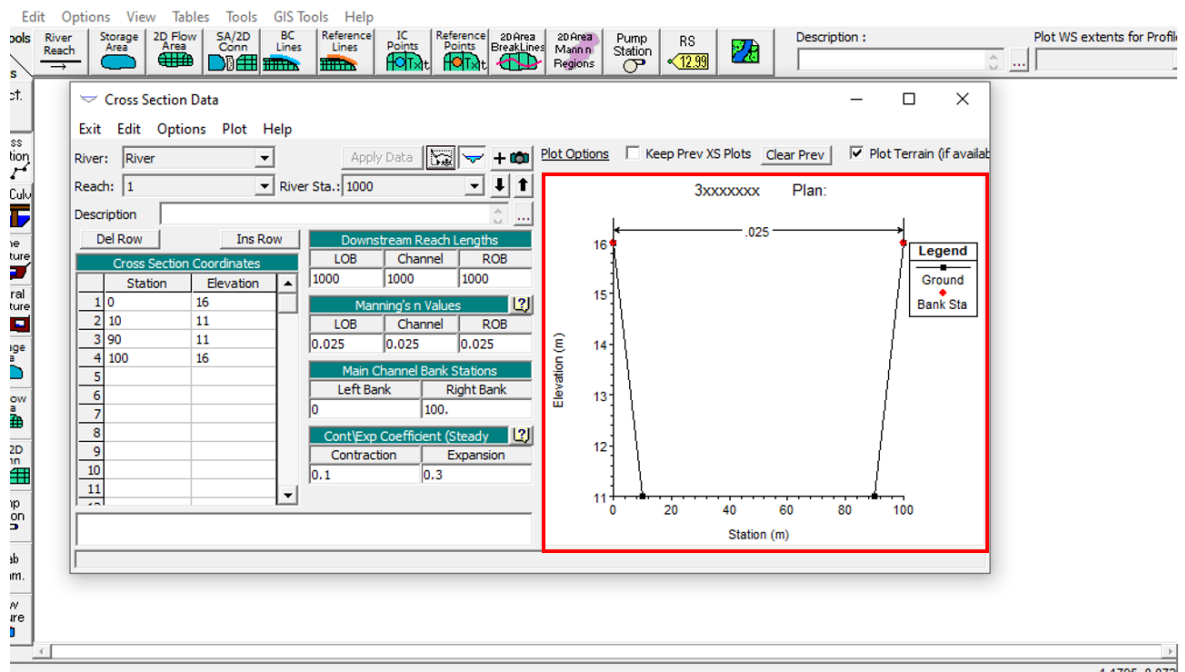


Figura 15. longitudes de los tres segmentos a 1000 metros.

11. . Interpolar Secciones

Ir a Tools → XS Interpolation → Within a Reach. Interpolare entre la estación 1000 y 0 a intervalos de 100 metros.

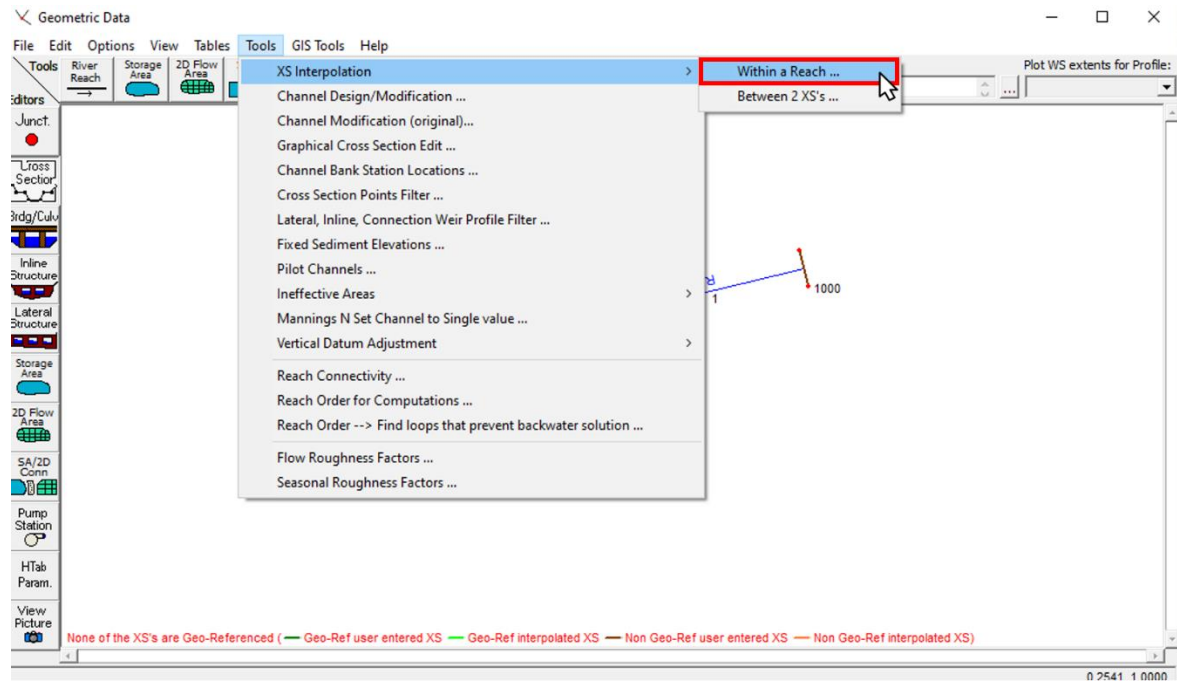


Figura 16. Tools → XS Interpolation → Within a Reach

Figura 17. Interpolarse
intervalos de 100 metros.

XS Interpolation by Reach

River:

Reach:

Upstream Riv Sta:

Downstream Riv Sta:

Maximum Distance between XS's:

Cut Line GIS Coordinates

☒ Linearly interpolate cut lines from bounding XS's
(only available when bounding XS's are Georeferenced)

☐ Generate for display as perpendicular segments to reach invert
(will be repositioned as cross section data is changed)

Decimal places in interpolated Sta/Elev:

Enter max distance between interp XSs.

entre la estación 1000 y 0 a

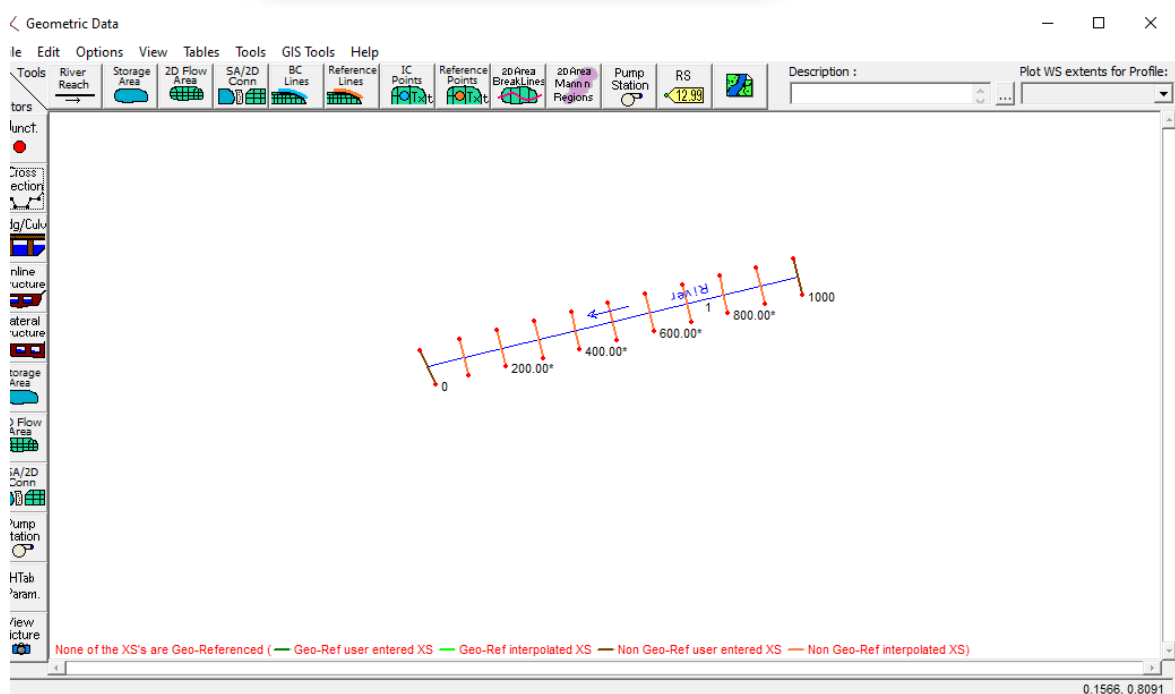


Figura 18.

12. Agregar Estructura en Línea

Abrir el editor de Estructuras en Línea (Inline Structure). Ir a Options → Add an Inline

Structure.

13. Asignar Estación

Asignar la estación de la estructura: 490.

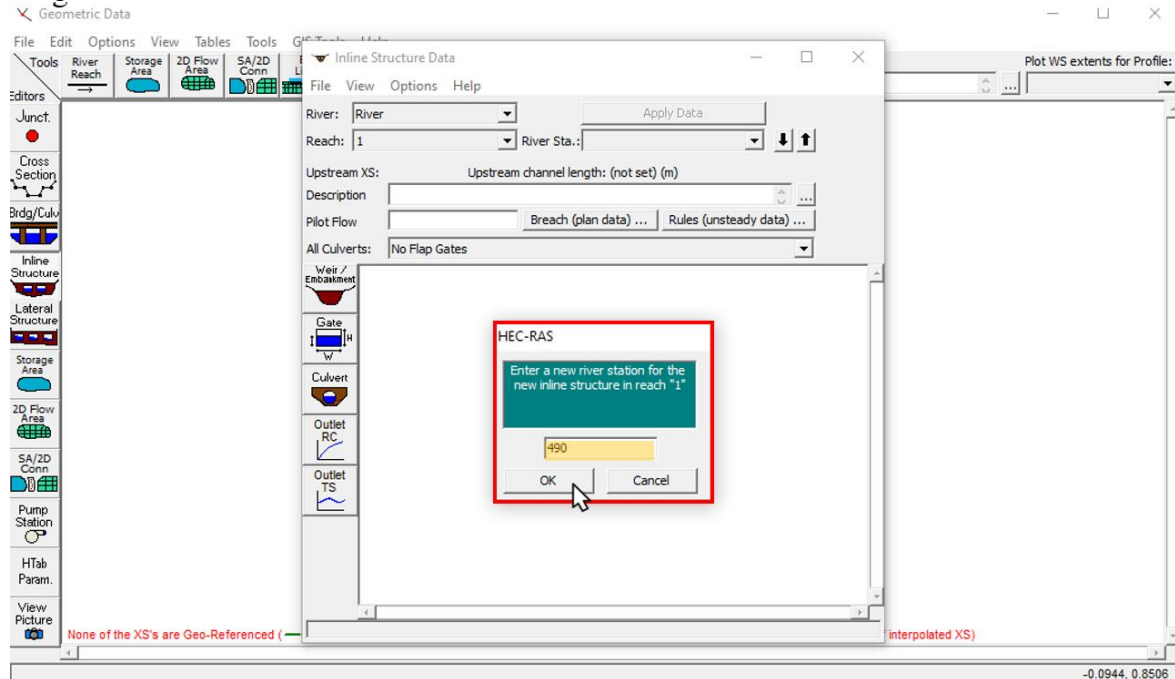


Figura 19. Estación de la estructura: 490.

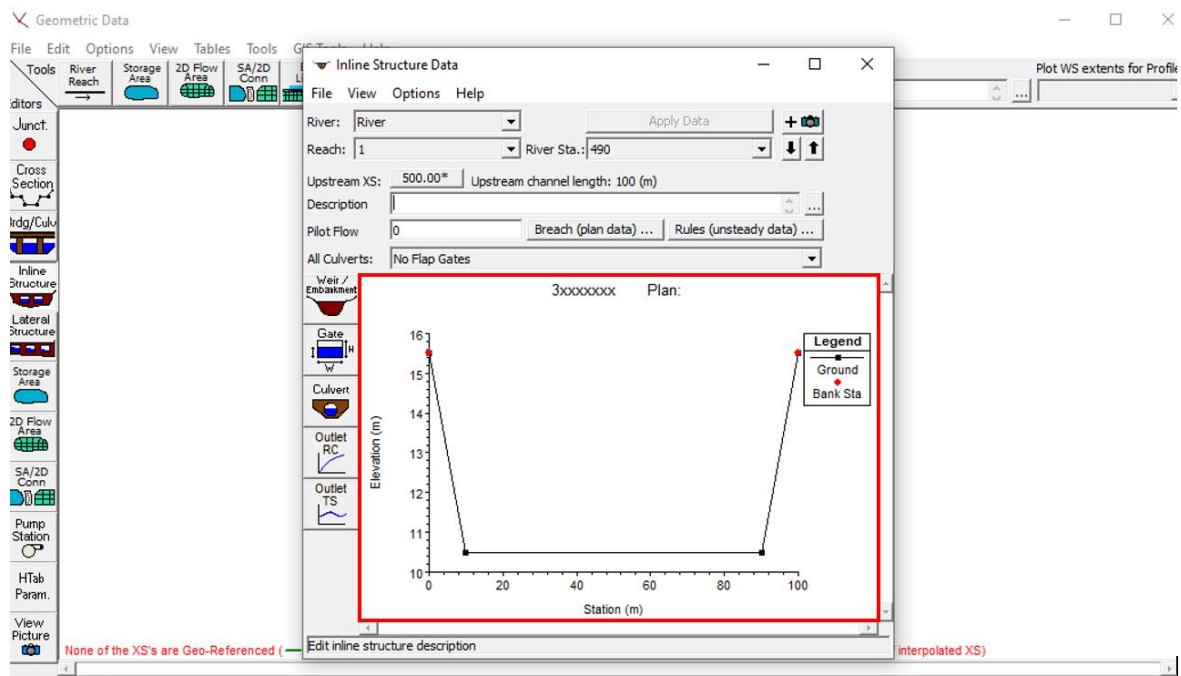


Figura 20.

14. Establecer Distancia Upstream

Asignar las distancias a la sección de Aguas Arriba en 10 metros para los tres segmentos.

15. Longitud del Vertedero

En la pestaña Weir/Spillway, asignar la longitud del vertedero (Weir Length): 15 metros.

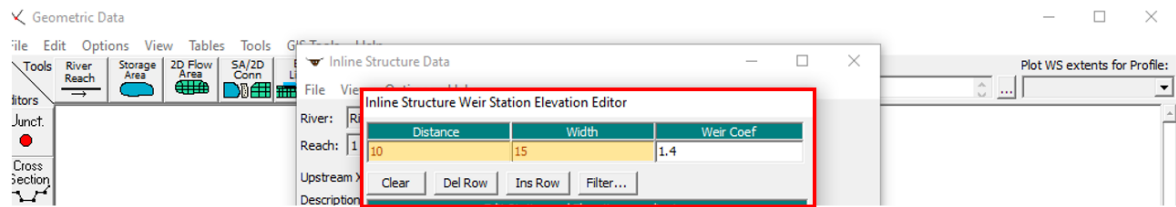


Figura 21. Distancias a la sección de Aguas Arriba y longitud del vertedero

16. Definir Cresta del Vertedero

Ingresar las coordenadas de la cresta (ejemplo: (0, 15.49), (10, 10.49), (90, 10.49), (100, 15.49)).

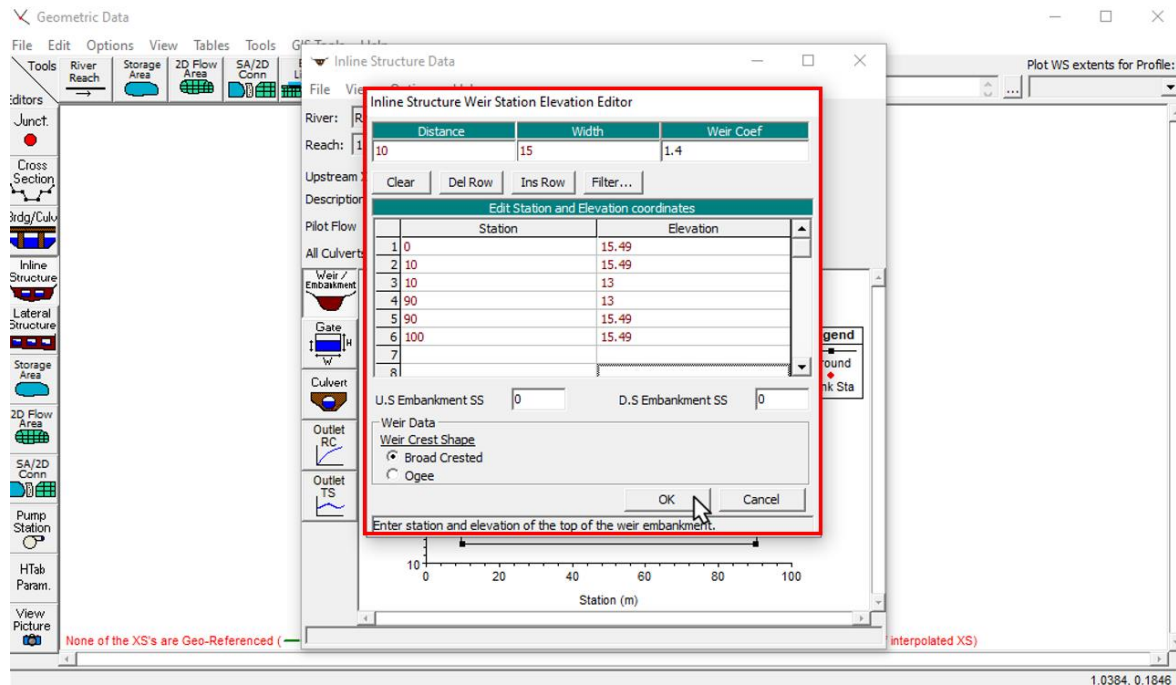


Figura 22. Coordenadas de la cresta

17. Seleccionar Tipo de Vertedero

En Weir Crest Shape, seleccionar: Broad Crested Weir (Vertedero de Cresta Ancha).

Distance	Width	Weir Coef
10	15	1.4

Station	Elevation
1 0	15.49
2 10	15.49
3 10	13
4 90	13
5 90	15.49
6 100	15.49
7	
8	

U.S Embankment SS: 1.5 D.S Embankment SS: 2

Weir Data
Weir Crest Shape
☒ Broad Crested
☐ Ogee

Enter downstream embankment side slope. Horiz dist to 1 step vertical.

Figura 23. Vertedero de Cresta Ancha

18. Guardar Vertedero

Hacer clic en el botón Apply Data.

19. Abrir Editor de Flujo

Abrir el editor de Flujo Estacionario (Steady Flow Data).

20. Ingresar Caudales

Crear 5 perfiles. Ingresar los caudales: 15, 50, 100, 150, 250.

Steady Flow Data

Description: [] Apply Data

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max): 5 Reach Boundary Conditions ...

Locations of Flow Data Changes

River: [River] Add Multiple...

Reach: 1 River Sta.: 1000 Add A Flow Change Location

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates				
River	Reach	RS	PF 1	PF 2	PF 3	PF 4	PF 5
1 River	1	1000	50	100	150	200	250

Edit Steady flow data for the profiles (m³/s)

Figura 24. Caudales: 15, 50, 100, 150, 250.

21. Definir Condiciones de Contorno
Hacer clic en Reach Boundary Conditions.

22. Condición Aguas Arriba (Upstream)
Seleccionar Normal Depth. Ingresar la pendiente de solera: 0.01

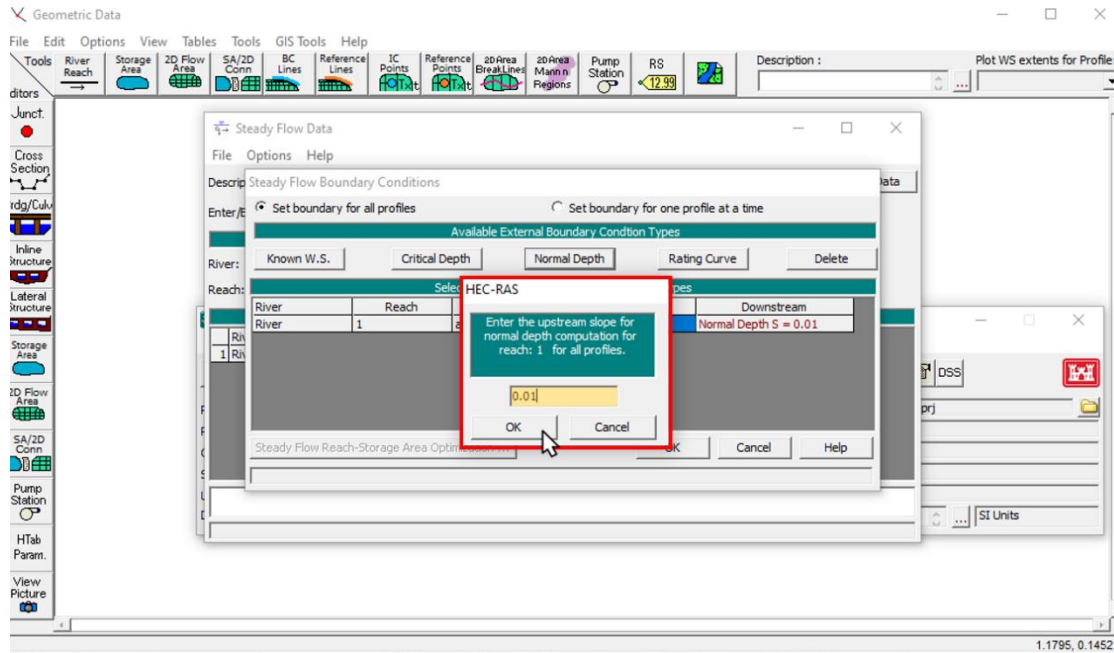


Figura 25. (Upstream) Pendiente de solera: 0.01

23. Condición Aguas Abajo (Downstream)
Seleccionar Normal Depth. Ingresar la pendiente de solera: 0.01.

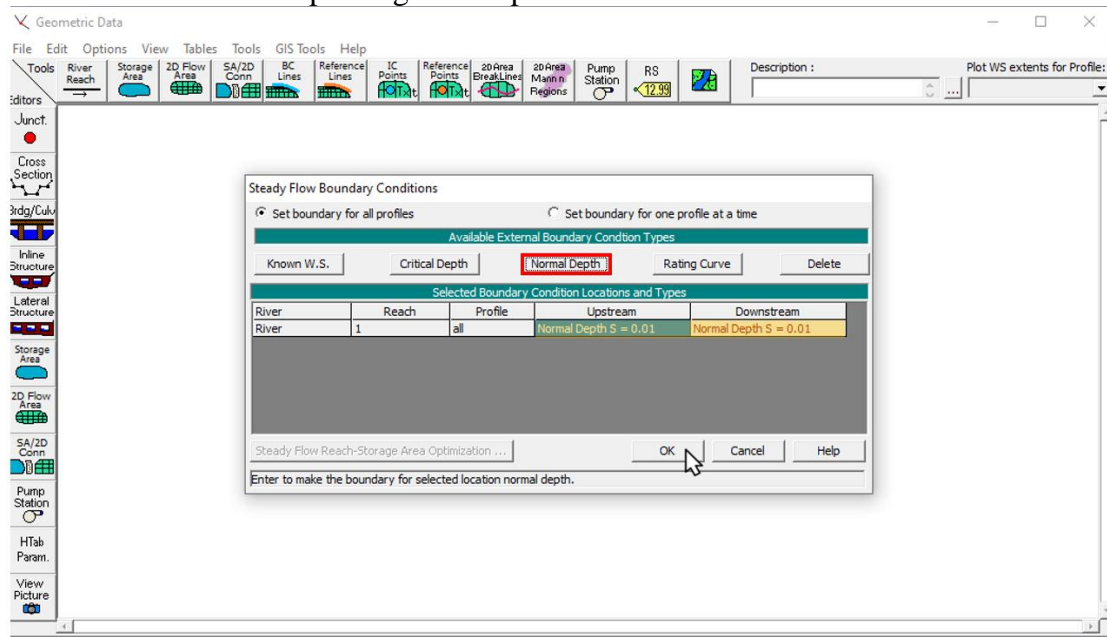


Figura 26. (Downstream) Pendiente de solera: 0.01

24. Guardar Datos

Clic en OK. Guardar el flujo (File → Save Flow Data).

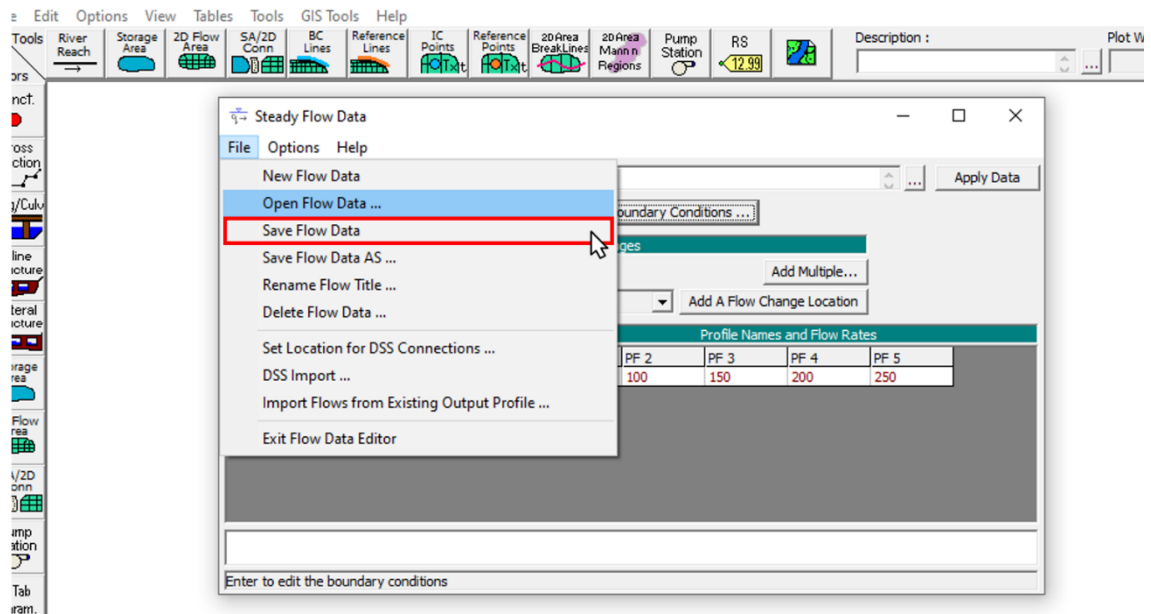


Figura 27. File → Save Flow Data

25. Guardar Geometría

Cerrar el editor de Geometría. Guardar (File → Save Geometric Data).

26. Ejecutar Análisis

Abrir la ventana de Análisis de Flujo Estacionario (Steady Flow Analysis).

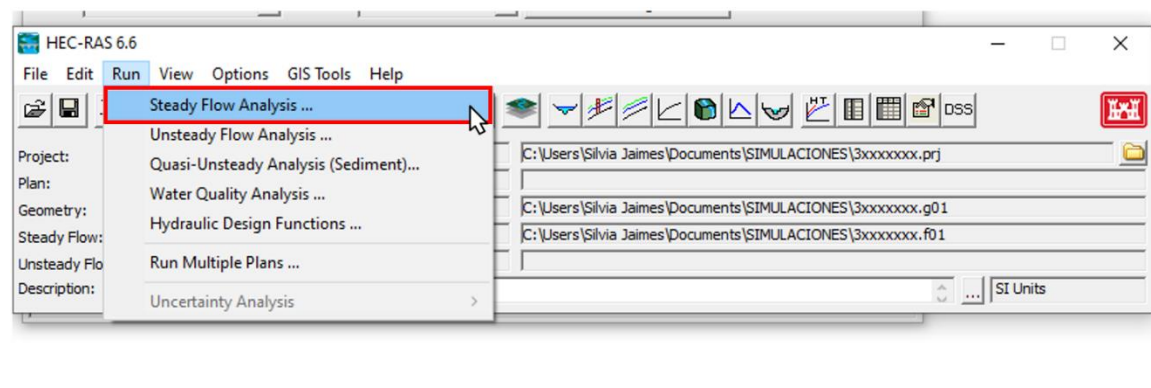


Figura 28. Steady Flow Analysis

27. Configurar Corrida

Seleccionar Mixed Flow (Flujo Mixto). Clic en Compute.

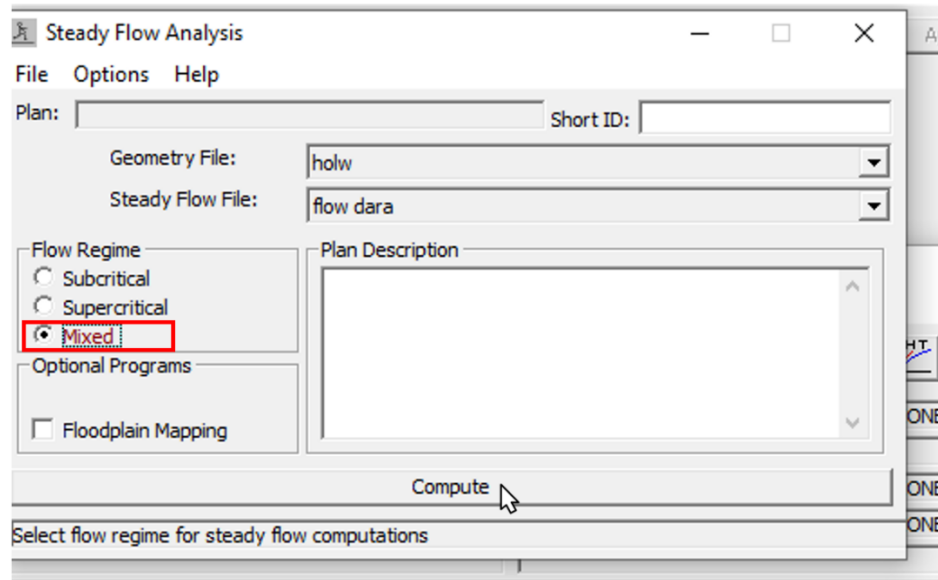


Figura 29. Mixed Flow

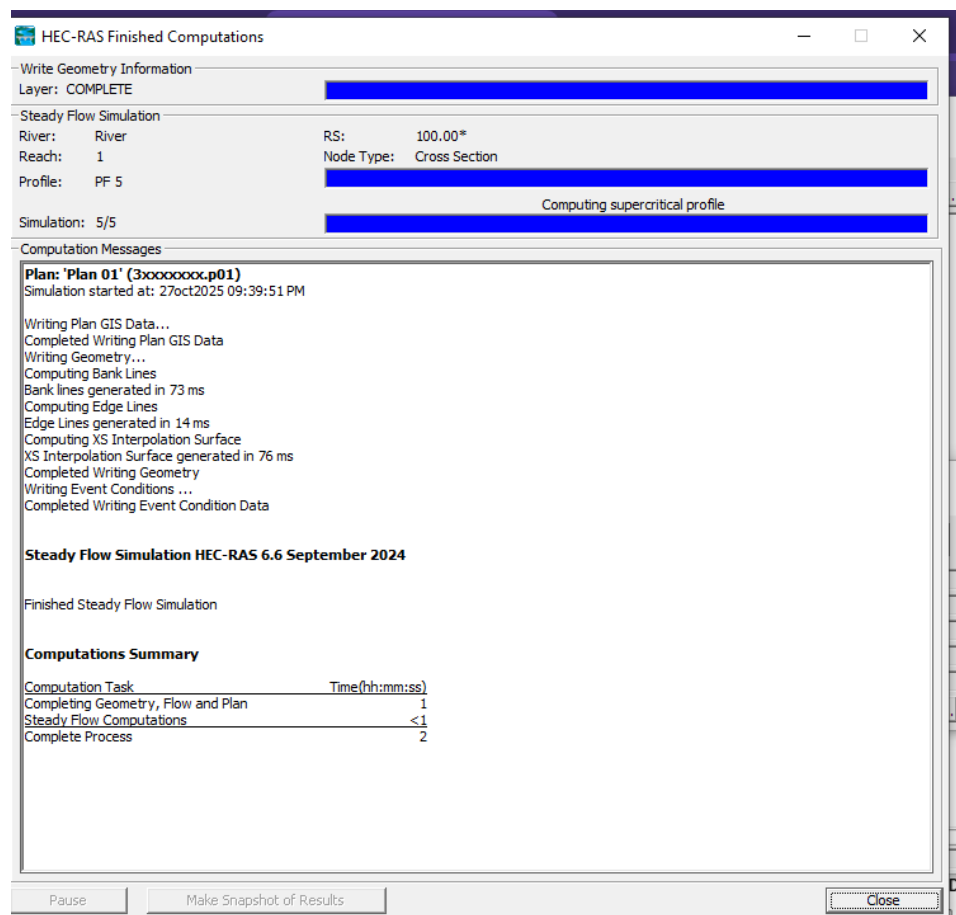


Figura 30.

28. Ver Perfiles y Gráficas

Hacer clic en Water Surface Profile o View → Perspective Plots.

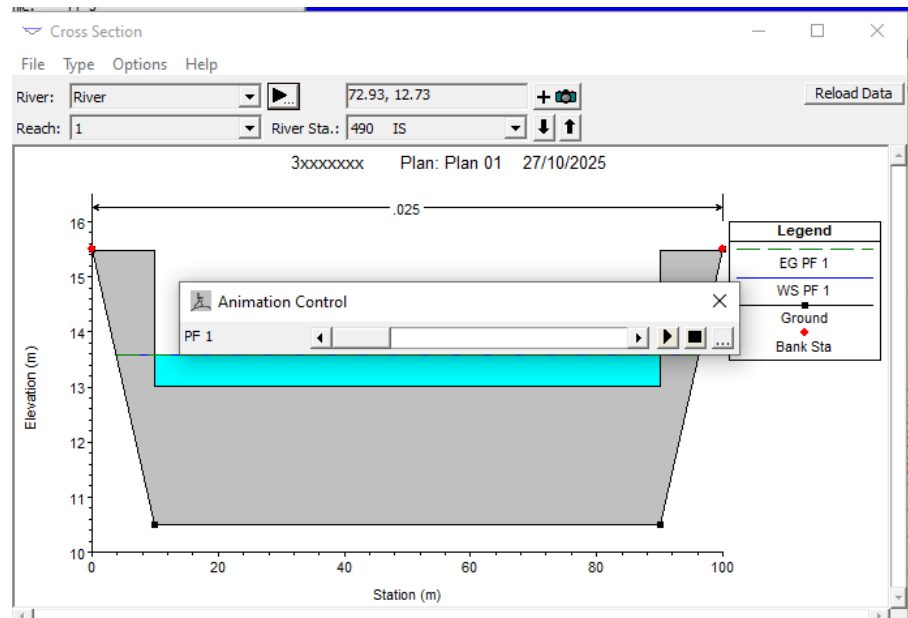


Figura 31. View → Perspective Plots.

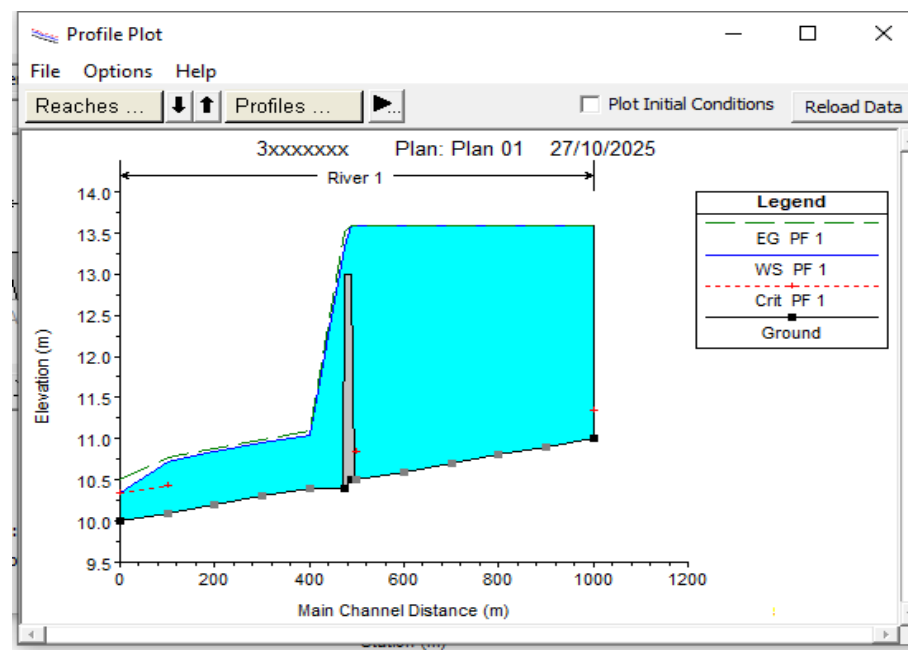


Figura 32.

29. Ver Tablas de Salida

Hacer clic en View Output Tables para revisar los resultados numéricos.

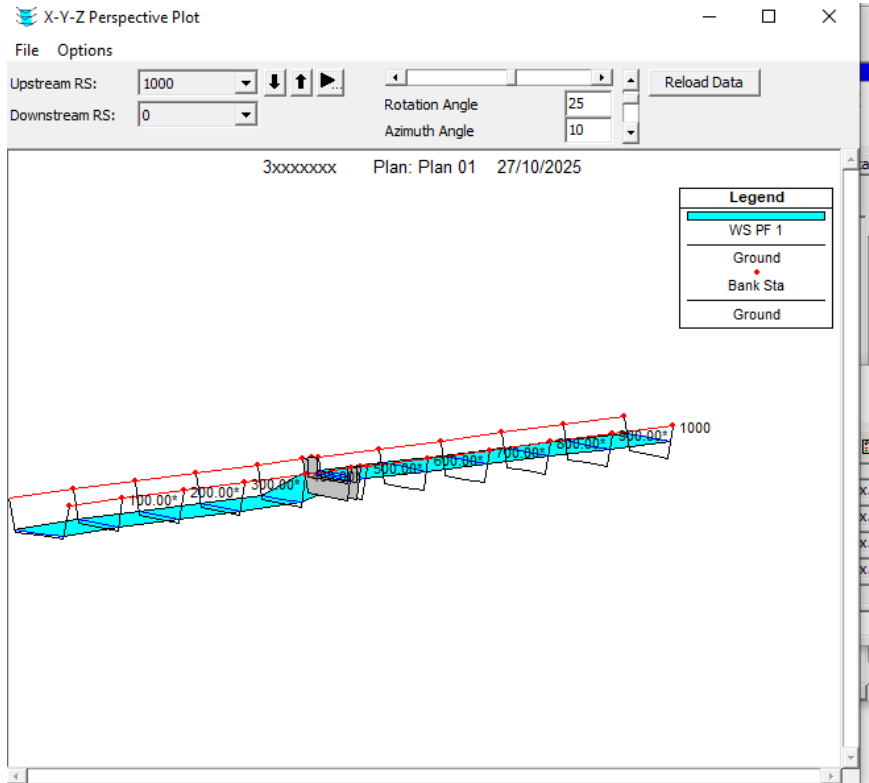


Figura 33. Resultados numéricos

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: River Reach: 1 Profile: PF 1

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 # Ch
1	1000	PF 1	50.00	11.00	13.58	11.34	13.59	0.000010	0.23	220.05	90.33	0.05
1	900.00*	PF 1	50.00	10.90	13.58		13.59	0.000009	0.22	229.03	90.73	0.04
1	800.00*	PF 1	50.00	10.80	13.58		13.58	0.000008	0.21	238.05	91.13	0.04
1	700.00*	PF 1	50.00	10.70	13.58		13.58	0.000007	0.20	247.13	91.53	0.04
1	600.00*	PF 1	50.00	10.60	13.58		13.58	0.000006	0.20	256.24	91.92	0.04
1	500.00*	PF 1	50.00	10.50	13.58	10.84	13.58	0.000006	0.19	265.41	92.32	0.04
1	490	In Struct										
1	400.00*	PF 1	50.00	10.40	11.05		11.10	0.001023	0.95	52.80	82.60	0.38
1	300.00*	PF 1	50.00	10.30	10.95		10.99	0.001042	0.95	52.51	82.58	0.38
1	200.00*	PF 1	50.00	10.20	10.84		10.89	0.001081	0.96	51.92	82.56	0.39
1	100.00*	PF 1	50.00	10.10	10.72	10.44	10.77	0.001168	0.99	50.71	82.50	0.40
1	0	PF 1	50.00	10.00	10.34	10.34	10.51	0.008914	1.83	27.39	81.36	1.00

Figura 34. Resultados numéricos

5.2 Video de la simulación

- ✓ A continuación, se presentará el enlace del video que hace referencia a la simulación número ocho presentada en este documento. Este video hace parte de una serie de tutoriales que apoyan al estudiante en el manejo del programa computacional.
- ✓ Enlace del vídeo: <https://youtu.be/7tUgdcTm0tU?si=0SMW9y0oZUBLtUrn>

6. Descripción del entregable

6.1 Entregables de la Simulación Inicial

Debe entregar un informe de la simulación hecho en WORD y guardarlo como PDF, en este lo que se va a reportar son datos, perfiles, etc. Para esto tome capturas de pantalla de las siguientes cosas:

- ✓ Creación del Proyecto: Captura de la ventana inicial de HEC-RAS mostrando la creación del nuevo proyecto y el nombre asignado.
- ✓ Definición de la Geometría: Captura del editor Geometric Data con el canal y tramo dibujados correctamente.
- ✓ Sección Transversal Inicial: Captura de la ventana Cross Section Data con la primera sección (Estación 0) definida.
- ✓ Rugosidad de Manning: Captura de la pestaña Manning's n Values con los valores de rugosidad asignados a cada segmento.
- ✓ Interpolación de Secciones: Captura del proceso de interpolación entre estaciones dentro del tramo del canal.
- ✓ Modelado del Vertedero: Captura de la ventana Geometric Data que muestre la selección de Broad Crested Weir (Vertedero de Cresta Ancha).
- ✓ Ingreso de Caudales: Captura de la tabla Steady Flow Data con los cinco caudales ingresados (por ejemplo: 15, 50, 100, 150, 250).
- ✓ Condiciones de Contorno: Captura de la ventana Boundary Conditions confirmando la condición Normal Depth para los límites aguas arriba y aguas abajo.
- ✓ Ejecución Exitosa: Captura de la ventana Steady Flow Analysis mostrando que el cálculo se realizó sin errores (botón Compute ejecutado correctamente).
- ✓ Gráfico de Perfiles: Captura del gráfico View Profile Plot mostrando el perfil de la superficie de agua para todos los caudales simulados.
- ✓ Resultados Numéricos: Captura de la Tabla de Resultados Detallada de la sección transversal ubicada justo encima del vertedero.

NOTA: (TENGA EN CUENTA QUE LAS CAPTURAS DEBEN INCLUIR TAMBIEN LA PARTE DEL ADMINISTRADOR DE TAREAS PARA QUE SE PUEDA VER LA FECHA, HORA Y DIA QUE LO HIZO)

6.2 Preguntas de Análisis

- ¿Existe evidencia de flujo subcrítico, supercrítico o mixto en el modelo? ¿Dónde

ocurre y por qué?

- Compare las diferencias entre los perfiles de superficie del agua obtenidos para los cinco caudales analizados. ¿Cuál genera mayor impacto hidráulico en el canal y por qué?
- ¿Qué diferencias observa entre el flujo antes, sobre y después del vertedero de cresta ancha?
- ¿Cómo influye la longitud y altura de la cresta del vertedero en los resultados del flujo simulado?
- ¿Cómo afecta la rugosidad del canal (Manning n) al perfil de la superficie libre?
- ¿En qué zonas del modelo se presentan las mayores pérdidas de energía y a qué se deben?
- Si se aumentara el caudal máximo en un 50 %, ¿qué cambios esperarías en el comportamiento del flujo y en la superficie del agua sobre el vertedero?

7. Referencias bibliográficas

- Marbello, R. (2005). 2. Vertederos y calibración de vertederos de medida. Universidad Nacional de Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21725/3353962.2005.Parte%206.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Portillo, L. (2012). Calibración de Vertederos de Pared Delgada para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3356_C.pdf
- Villón, B. (1995). Ediciones Villón.
https://www.academia.edu/34789460/Ediciones_Vill%C3%B3n
- Pardo Aguilar, M. J., & Reyes Jamaica, D. V. (2023). Evaluación de alternativas para el equipamiento del nuevo Laboratorio de Hidráulica de la UIS [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS.
- Sáenz, L. M. (2003). Diseño de estructuras hidráulicas a escala para ser instaladas en el laboratorio de hidráulica de la UIS [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS.
- Santaella Ojeda, R. A. (2007). Diseño de la nueva plataforma científica, tecnológica y docente del laboratorio de hidráulica [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS.
- Malaver Nieto, E. D. (2023). Desarrollo de simulaciones de modelos hidráulicos como herramienta de soporte de la enseñanza del laboratorio de hidráulica [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio institucional UIS.