

Manual de laboratorio de simulación computacional

Práctica N°3: Evaluación de la Transición en Flujo Subcrítico con Ancho Variable

Fuente del recurso: Ejemplo del libro Hidráulica de Canales Abiertos (Chow, 1994) adaptado por Eliel David Malaver Nieto, estudiante UIS en el desarrollo de su trabajo de grado

1. Objetivos de la simulación

- ✓ Comprender los conceptos de las transiciones en flujo subcrítico en canales abiertos mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional HEC-RAS
- ✓ Aplicar los conceptos adquiridos sobre las transiciones en flujo subcrítico mediante el desarrollo de un ejemplo orientador utilizando HEC-RAS.
- ✓ Evaluar y fortalecer la comprensión de los conceptos de las transiciones en flujo subcrítico en canales abiertos, a través de la resolución de preguntas orientadoras que involucren la aplicación de los conocimientos teóricos en situaciones prácticas simuladas con la herramienta HEC-RAS

2. Requerimientos para la simulación

- ✓ Sistema operativo Windows 7 de 64-bit (o superior) o Linux
- ✓ Seguir la Guía N°1: Proceso de instalación de HEC-RAS
- ✓ Preferiblemente poseer la versión 5.0.7 del programa HEC-RAS

3. Introducción

El flujo de agua en canales abiertos es un tema fundamental en la hidráulica y la ingeniería civil. En particular, las transiciones en régimen subcrítico son un fenómeno que se produce cuando el flujo cambia de una sección del canal a otra, y se caracteriza por un cambio en la profundidad y la velocidad de este. Esta clase de fenómenos puede tener un impacto significativo en el comportamiento del flujo y la capacidad de transporte de sedimentos, lo que puede tener consecuencias importantes en el diseño y la operación de estructuras hidráulicas como puentes, compuertas, presas y canales.

En este contexto, la herramienta computacional HEC-RAS es una de las más utilizadas para el modelado y la simulación de flujos en canales abiertos, permitiendo analizar su comportamiento en diferentes condiciones hidráulicas.

En esta práctica de laboratorio, se abordarán los conceptos fundamentales de las transiciones en flujo subcrítico en canales abiertos y se utilizará la herramienta HEC-RAS para simular y analizar el comportamiento del flujo en diferentes situaciones. A través de la simulación, el análisis y la resolución de un ejemplo orientador, los estudiantes podrán fortalecer sus habilidades prácticas en el uso de la herramienta HEC-RAS y su aplicación en la ingeniería civil, específicamente en el análisis de transiciones en flujo subcrítico en canales abiertos.

4. Marco teórico

4.1 La energía en canales no prismáticos

Un canal no prismático es aquel cuya geometría no es constante a lo largo de su longitud, lo que resulta en cambios en la profundidad y velocidad del flujo. Esto puede deberse a variaciones en la pendiente, la forma de la sección transversal, la presencia de obstáculos o cualquier otro factor que afecte la estructura del canal.

En los canales no prismáticos, la asunción de la energía en una sola curva específica para todas las secciones transversales, como se hace en canales prismáticos, no es válida debido a que la sección transversal varía a lo largo del canal. Como resultado, la curva de energía específica también varía de una sección a otra. Esta variación se puede visualizar de manera más clara mediante una representación gráfica tridimensional de las curvas de energía a lo largo del canal, tal como se ilustra a continuación (Figura 1) (Chow, 1994):

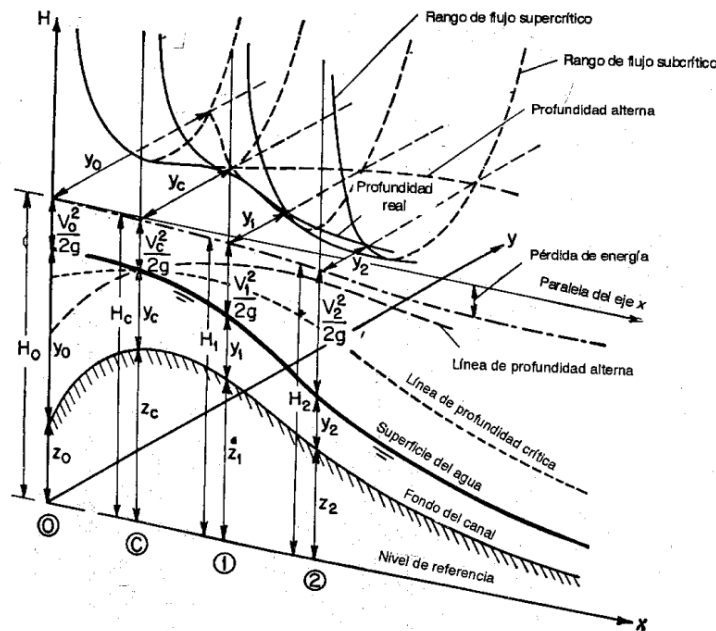


Figura 1 Gráfica tridimensional de la variación de la curva de energía en canales no prismáticos (Chow, 1994)

4.2 Medidores en régimen crítico

Cuando estas transiciones permiten encontrar una relación entre la profundidad del flujo y el caudal presente en él, se denominan medidores en régimen crítico. Y cuando su propósito principal es encontrar el valor del caudal presente en el flujo, o regular los niveles del agua en el canal (aguas arriba o aguas abajo), se les denomina vertederos.

Basado en el principio del flujo crítico, se han desarrollado algunas estructuras hidráulicas para la medición del flujo, esto permite que mediante la construcción de ciertas estructuras que cambiarán el comportamiento del flujo, se puedan encontrar valores de caudal de manera más fácil; ya que, el lograr la medición del caudal en un canal es una de las principales dificultades en la hidráulica de canales abiertos. Se suele generar la profundidad crítica mediante la construcción de un obstáculo en

el canal, tal como un resalto en el fondo, un vertedero, o mediante una contracción en la sección transversal del canal, como es el caso de una canaleta de flujo crítico. El empleo de canaletas de régimen crítico, son una estructura común que permite la medición del flujo y reduce las pérdidas de carga en el flujo (Marbello, 2005).

4.2.1 Definición de medidores en régimen crítico

Los medidores en régimen crítico son estructuras de control cuya presencia en un flujo a superficie libre, obliga el establecimiento de un régimen crítico. Esta condición permite establecer una relación entre el caudal y la profundidad del flujo y, debido a esto, a ciertas estructuras se les denomina aforadores o medidores en régimen crítico (Marbello, 2005).

4.2.2 Estado crítico del flujo

El estado crítico del flujo se definió como $dE/dy = 0$, llegando a las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Q^2 T_c}{g A_c^3} = 1 \quad (1)$$

Siendo igual a la siguiente expresión:

$$F^2 = 1 \quad (2)$$

A partir de la definición de energía específica, se encuentra una relación entre el caudal y la altura del tirante hidráulico si el valor de la energía permanece constante, siendo esto:

$$E = E_0 = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (3)$$

Si despejamos el valor del caudal, encontraremos una función que relacionará el valor del caudal con la altura del tirante hidráulico, siendo esto:

$$Q = \sqrt{2gA(E_0 - y)} \quad (4)$$

Si graficamos el comportamiento de la función presentada en la ecuación 4, encontraremos uno parecido al que se muestra en la *Figura 2*.

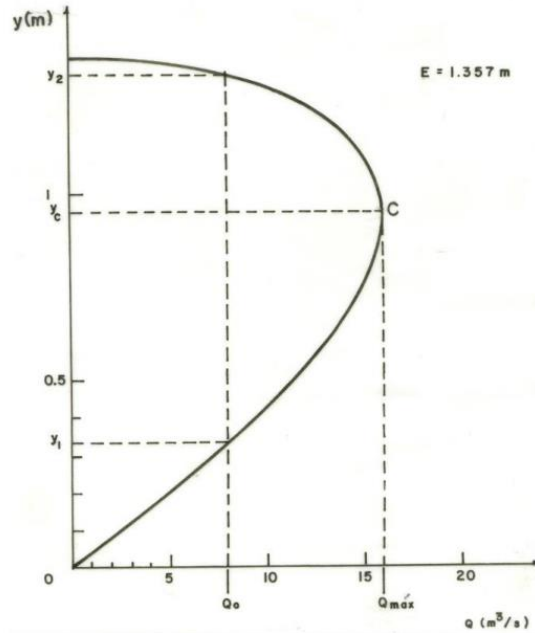


Figura 2 Relación entre el caudal y la profundidad (Marbello, 2005)

Como se observa en la *Figura 2*, el valor de caudal máximo se da en la condición de tirante crítico, esto se puede confirmar mediante la derivación de la ecuación 4 con respecto a la altura del tirante hidráulico e igualándola a cero, con lo cual se obtendrá que el número de Froude es igual a 1. Y obteniendo para otro valor de caudal, dos valores de profundidades conjugadas o alternas, que generarán una magnitud de caudal menor a la condición de altura crítica, manteniendo el valor de la energía constante.

4.2.3 Ejemplos de medidores en régimen crítico

Algunos ejemplos de los modelos de los medidores en régimen crítico son: la caída hidráulica libre y el escalón en el fondo del canal.

- ✓ **La caída hidráulica libre:** Se presenta cuando el fondo del canal se interrumpe en su extremo de aguas abajo, produciendo un rápido cambio en la profundidad del flujo desde un nivel alto, aguas arriba, a un nivel bajo en el extremo aguas abajo, seguido de una caída libre de chorro como se muestra en la *Figura 3*. Cuando esta caída se presenta en un canal horizontal o de pendiente suave, ocurre un cambio de régimen desde subcrítico aguas arriba, hasta un régimen supercrítico aguas abajo, pasando necesariamente por el estado crítico, es este paso entre regímenes el que permite el cálculo de la profundidad crítica y de esta manera calcular el valor del caudal presente en el canal (Marbello, 2005).

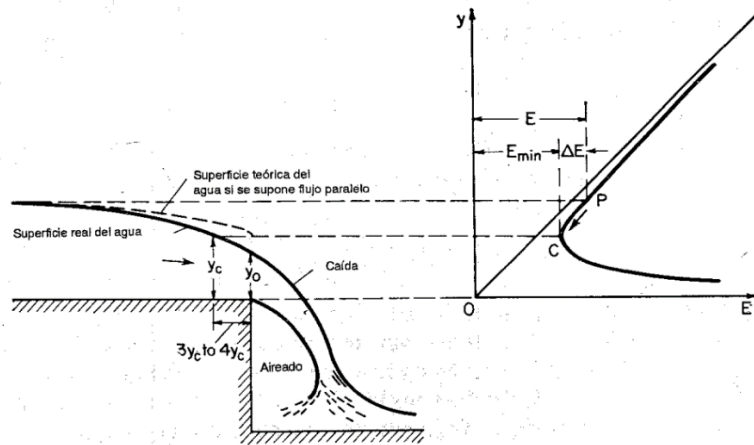


Figura 3 La caída hidráulica (Chow, 1994)

- ✓ **Escalón en el fondo del canal:** Es una estructura que actúa como un control hidráulico para el flujo de aguas arriba, forzando el establecimiento del régimen crítico en su cresta (Marbello, 2005), la *Figura 4* muestra a continuación una representación de un flujo que está sometido a un escalón en el fondo del canal (en este caso una ascensión).

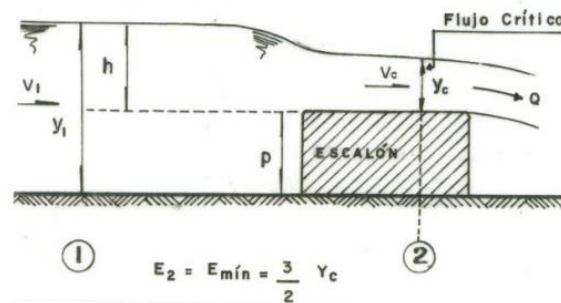


Figura 4 Representación de un escalón en el fondo del canal (Marbello, 2005)

4.3 Variación de la profundidad del flujo en un canal rectangular de ancho variable

Sea el flujo en un canal rectangular de ancho variable, donde se pretende analizar la variación de la profundidad del flujo a lo largo del canal. En la *Figura 5*, se muestra una representación del problema a abordar, de tal manera que se logre un análisis adecuado.

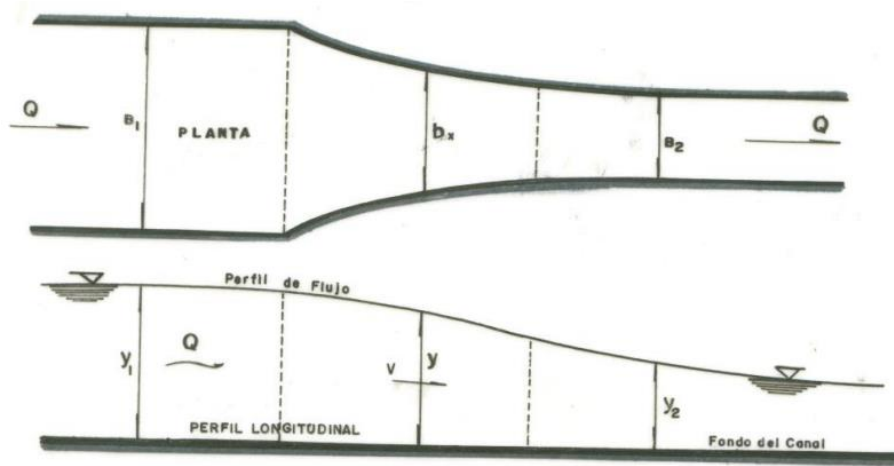


Figura 5 Canal rectangular de ancho variable (Marbello, 2005)

Partiendo de la ecuación de Bernoulli, se tiene que:

$$H = Z + y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (5)$$

Para canales rectangulares $A = by$, donde B es el ancho del canal; tenemos:

$$H = Z + y + \frac{Q^2}{2gB^2y^2} \quad (6)$$

Debido a que el ancho B varía a lo largo del eje x, se sustituirá en la ecuación anterior por b_x , resultando:

$$H = Z + y + \frac{Q^2}{2gb_x^2y^2} \quad (7)$$

De esta forma, al introducir el concepto de caudal unitario, $q_x = Q/b_x$, la ecuación 7 se convierte en:

$$H = Z + y + \frac{q_x^2}{2gy^2} \quad (8)$$

Si se deriva la ecuación 8 con respecto a x, para encontrar la variación de la energía a medida que avanza el flujo se tiene que:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dZ}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{1}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{q_x^2}{y^2} \right) \quad (9)$$

Y realizando una serie de suposiciones que no se abordarán en este documento pero que se puede encontrar en la sección 4.2.3 del título 4 (Medidores en régimen crítico) que hace referencia al manual de prácticas de laboratorio de la UNAL (Marbello, 2005), el cual se referenciará al final de este documento se encontrará una expresión que permite hallar la variación de la profundidad del flujo en una sección rectangular de ancho variable, siendo esta:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dH}{dx} - \frac{dZ}{dx} + \left[F^2 \left(\frac{y}{b_x} \right) \right] \frac{db_x}{dx}}{1 - F^2} \quad (10)$$

Donde:

H: Valor de energía total en la sección [m]

Z: Altura del fondo del canal desde un nivel de referencia [m]

F: Número de Froude del flujo en aproximación

y: Altura del flujo [m]

b_x : Variación de la base con respecto a x [m]

Si se supone un valor de energía constante, un flujo permanente con un ancho variable (b_x), y de fondo horizontal, es decir ($dZ/dx = 0$). Se presentarán 3 casos en los cuales el ancho del canal disminuye desde un valor B_1 , hasta un valor B_2 que es mayor al valor crítico, B_c . En el segundo caso el valor de B_2 se reducirá hasta el valor crítico, B_c , y finalmente se presenta un caso en el cual B_2 llegará hasta una magnitud inferior al valor crítico B_c , sin embargo, este último caso no se abordará en este documento.

A continuación, se presentarán los 3 casos en la *Figura 6*, a manera de representación de los problemas a abordar.

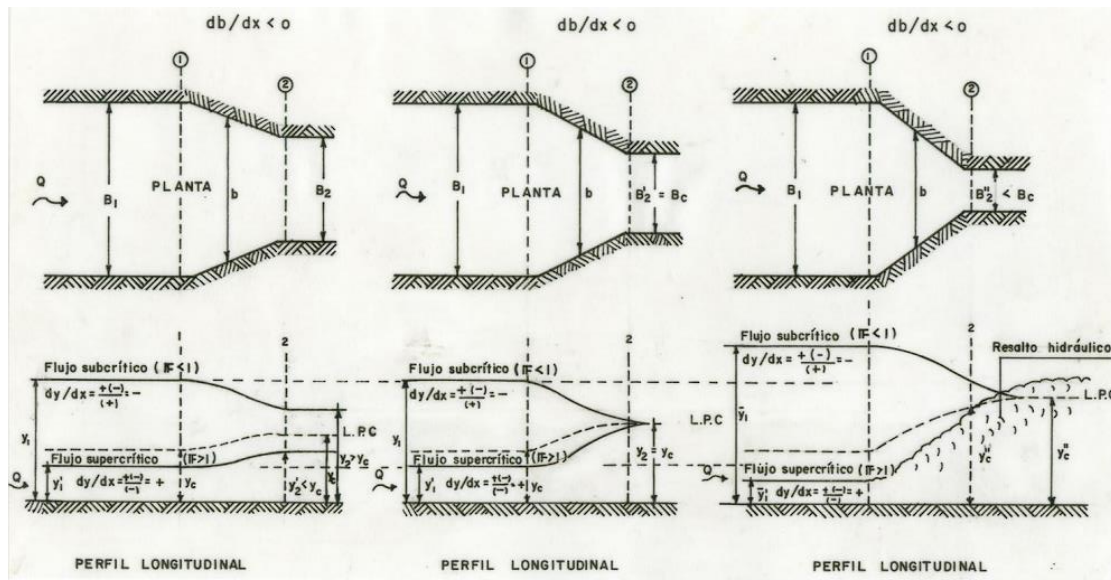


Figura 6 Representación de los casos a abordar (Marbello, 2005)

4.3.1 Primer caso ($B_2 > B_c$)

Si se supone que las pérdidas de energía por estrechamiento del canal se desprecian, es decir $dH/dx = 0$, y aplicando la ecuación de Bernoulli entre 1 y 2, y teniendo en cuenta que se tomará la altura desde el fondo del canal es decir $z_1 = z_2 = 0$, se tiene:

$$y_1 + \frac{q_1^2}{2gy_1^2} = y_2 + \frac{q_2^2}{2gy_2^2} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que el valor de Q , y_1 , B_1 , y B_2 se conocen, resulta una ecuación cúbica en y_2 , la cual se puede resolver mediante cualquier técnica numérica conocida.

Obteniendo así tres posibles soluciones, un valor negativo que es descartado físicamente, y dos valores positivos que hacen referencia a 2 alturas diferentes, una para un régimen subcrítico y otra para un régimen supercrítico, estas son:

y_2 , subcrítica, es decir $y_c < y_2 < y_1$.

y'_2 , supercrítica, es decir $y_1 < y'_2 < y_c$.

Para describir el perfil hidráulico del flujo a lo largo del canal se tienen dos casos posibles:

- Si el flujo en aproximación es subcrítico $(1 - F^2) > 0$; entonces, de la ecuación general para la variación del perfil hidráulico presentada en la ecuación 10 se obtiene:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{0 - 0 + \left[F^2 \left(\frac{y}{b_x} \right) \right] \frac{db_x}{dx}}{1 - F^2} \quad (12)$$

Siguiendo con el procedimiento:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left[F^2 \left(\frac{y}{b_x} \right) \right] \frac{db_x}{dx}}{1 - F^2} \quad (13)$$

Y realizando una inspección en los signos de los factores obtiene que:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{(+)(-)}{(+)} = (-) \quad (14)$$

Por lo tanto, si el flujo en aproximación es subcrítico, el factor del denominador tenderá a tener un signo positivo, y debido a que el primer factor del numerador es positivo ya que no hay la posibilidad de tener un signo negativo por sus características físicas y matemáticas, y el segundo factor del numerador hace referencia a que la tendencia del ancho del canal respecto a la longitud x es de decrecer, se obtiene finalmente que la tendencia de la profundidad del flujo a medida que avanza es de disminuir o abatirse, como se puede inferir del análisis de signos obtenido de la ecuación 14.

- Por otra parte, si el flujo de aproximación es subcrítico, el término $(1 - F^2) < 0$, y por lo tanto el término del denominador será negativo. Reescribiendo el análisis de signos presentado en la ecuación 14 resulta en:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{(+)(-)}{(-)} = (+) \quad (15)$$

En este caso, ocurre lo contrario, al tener un signo negativo en el denominador, causa que en el análisis de signos de la ecuación 15, la tendencia del fluido es a crecer, es decir, el perfil del flujo se eleva.

4.3.2 Segundo caso ($B_2 = B_c$)

Del primer caso vimos que a medida que el ancho del canal disminuye, también disminuye la energía en el punto 2 de la *Figura 6*, hasta un valor mínimo que, para canales rectangulares, es:

$$E_{2min} = E_c = \frac{3}{2}y_c \quad (16)$$

De la ecuación 16, y_c es la profundidad crítica correspondiente a la sección de ancho crítico $B_2 = B_c$. Aplicando la ecuación de Bernoulli entre 1 y 2 se tiene que:

$$y_1 + \frac{q_1^2}{2gy_1^2} = E_{min} \quad (17)$$

Y la energía mínima es igual a:

$$E_{min} = \frac{3}{2}y_c \quad (18)$$

Es importante recordar que el valor de y_c en canales rectangulares es igual a:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (19)$$

Si se sustituye esta relación en la ecuación 18 y luego en la ecuación 17, se encuentra que:

$$y_1 + \frac{q_1^2}{2gy_1^2} = \frac{3}{2}\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (20)$$

Y teniendo en cuenta que el caudal por unidad de ancho es igual a $q = Q/B$, donde B hace referencia al ancho del canal, para este caso el ancho del canal será el crítico, por lo tanto:

$$y_1 + \frac{q_1^2}{2gy_1^2} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB_c^2}} \quad (21)$$

Recordando que:

$$E_1 = y_1 + \frac{q_1^2}{2gy_1^2} \quad (22)$$

Y despejando de la ecuación 21, finalmente se encuentra una expresión para calcular el valor de ancho crítico al cual puede llegar una sección:

$$B_c = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{1}{g} Q E_1^{-\frac{3}{2}}} \quad (23)$$

5. Implementación de la simulación

5.1 Descripción del problema

Se tiene un canal rectangular por el cual está fluyendo a razón constante un caudal de 2.83 [m³/s]. Inicialmente el ancho del canal es de 3.05 [m], sin embargo, a partir de cierto punto del recorrido del flujo, el canal comienza un estrechamiento gradual hasta alcanzar un ancho de garganta de 0.86 [m]. Además de esto, debido a que los pobladores fueron emigrando de la zona, el cauce comenzó a recuperar nuevamente terreno y se expandió hasta un ancho total de 2.44 [m]. Tenga en cuenta que estos tres anchos de canal se encuentran sobre el mismo eje longitudinal del cauce. El coeficiente de rugosidad de Manning es de 0.015 y la sección de estudio de este cauce es totalmente horizontal. En la *Figura 7*, se muestra la representación del cauce.

La altura para todas las secciones transversales será de 2 metros, y se sabe que la altura del nivel del agua a partir del suelo en la sección 3 es de 1.524 [m] y en la sección 1 es de 0.2286 [m].

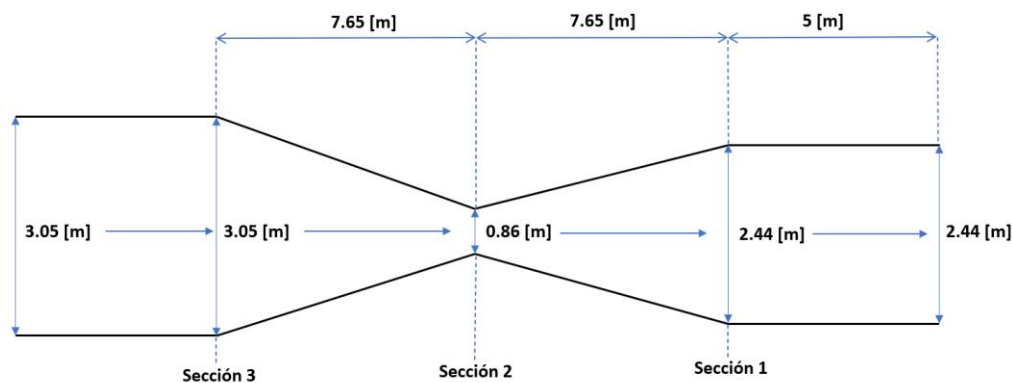


Figura 7 Representación de la quebrada en estudio

5.2 Proceso de simulación

Este se llevará a cabo en HEC-RAS, versión 5.0.7 (HEC-RAS, 2008), en el cual se deberán ingresar datos como la geometría del canal, valores de flujo (entre ellos condiciones de contorno) y un plan de simulación el cual tomará todos los datos anteriores y efectuará el proceso de simulación.

5.2.1 Abrir el programa HEC-RAS

Busque el acceso directo que se creó al instalar HEC-RAS, y ejecute el programa

5.2.2 Creación del proyecto

En este paso proceda a crear el proyecto de tal manera que se guarde en una ubicación segura dentro del ordenador:

- ✓ Ingrese al programa HEC-RAS, dé clic en *File* y luego en *New Project* (Figura 8)

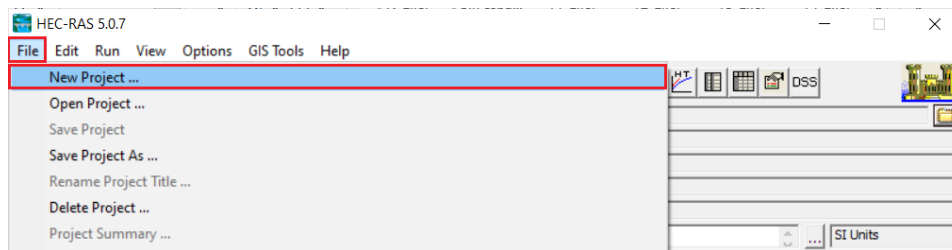


Figura 8 Ventana para la creación de un nuevo proyecto

- ✓ Dé clic en el botón *Default Project Folder*, y luego de esto dé clic en el botón *Create Folder* (Figura 9)

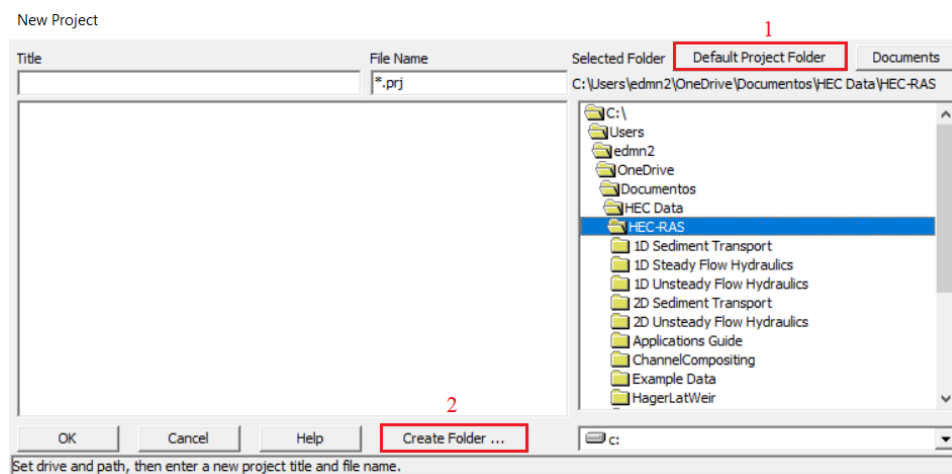


Figura 9 Ventana de creación de un nuevo proyecto

- ✓ En la ventana emergente coloque el nombre de la carpeta *Simulación 3* (Figura 10)

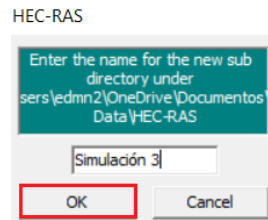


Figura 10 Ventana para nombrar la nueva carpeta

- ✓ Dé clic en “OK”. La nueva carpeta se muestra en la ruta seleccionada (*Figura 11*)

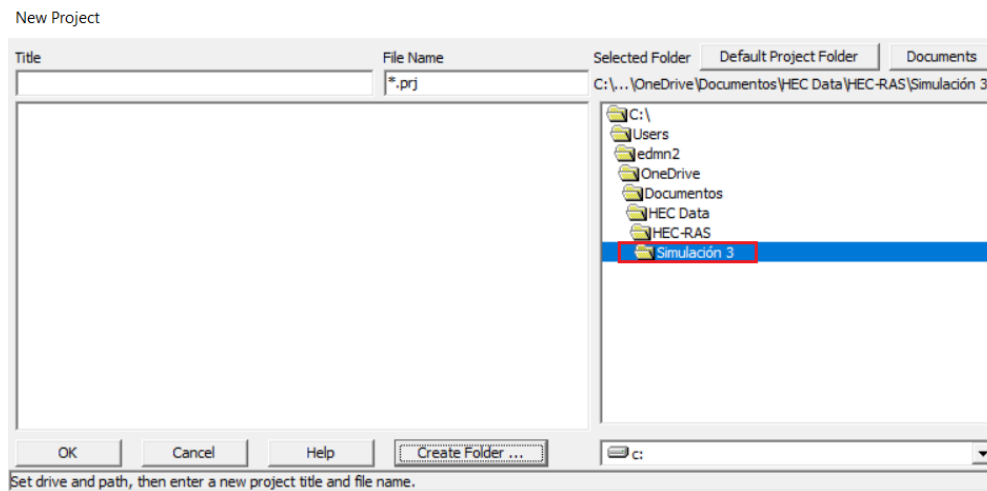


Figura 11 Ventana del proyecto con una nueva carpeta asignada

- ✓ Ingrese el nombre del proyecto “Práctica_3” en el campo Title. Acepte la asignación del nombre presionando la tecla “OK” (*Figura 12*)

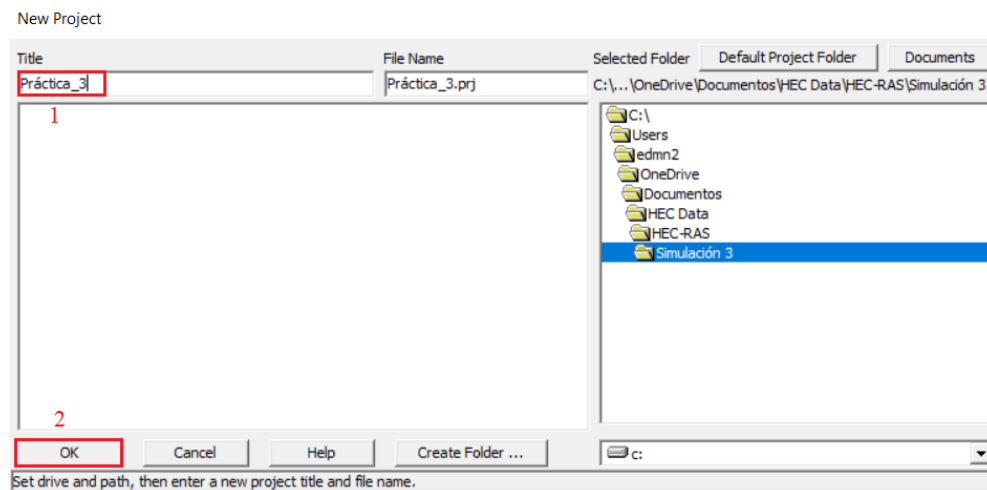


Figura 12 Ventana del nombre y guardado del proyecto

- ✓ La ventana emergente busca confirmar la creación del proyecto en la ruta seleccionada. Si está de acuerdo, seleccione “Aceptar” (*Figura 13*)

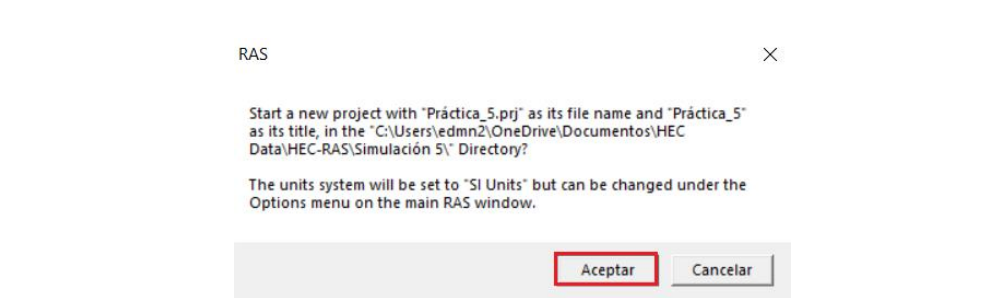


Figura 13 Ventana de carpeta final de destino y sistema de unidades establecido para este proyecto

- ✓ Configure el sistema de unidades a métrico a través de la opción “Unit system (US Customary/SI)” localizado en el menú de opciones del programa (Figura 14)

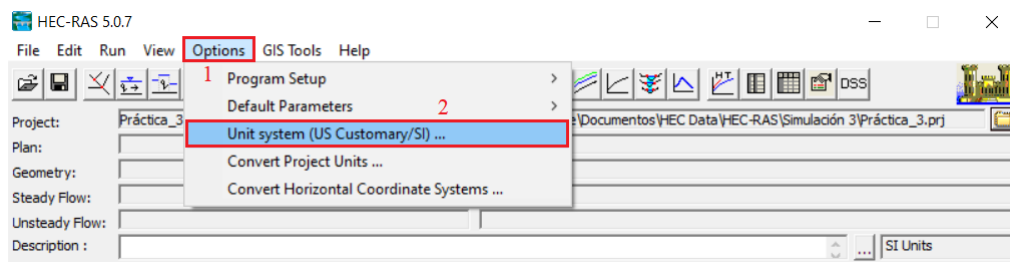


Figura 14 Ventana para la configuración del sistema de unidades

- ✓ Seleccione el sistema métrico internacional (“System international”). Puede dejar esta selección por defecto para nuevos proyectos y aceptar dando clic en “OK” (Figura 15)

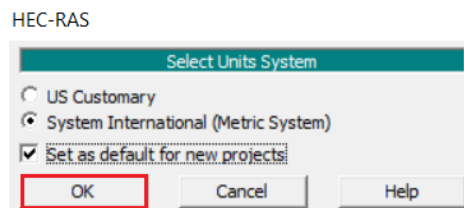


Figura 15 Ventana de selección del sistema de unidades

- ✓ De esta manera ya tiene el sistema de unidades configurado y una carpeta en la cual se guardarán todos los archivos de la práctica

5.2.3 Datos Geométricos

Primera sección transversal

- ✓ Dé clic en el icono de *Geometry Data* que se muestra en la Figura 16



Figura 16 Icono de datos geométricos

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana (Figura 17)

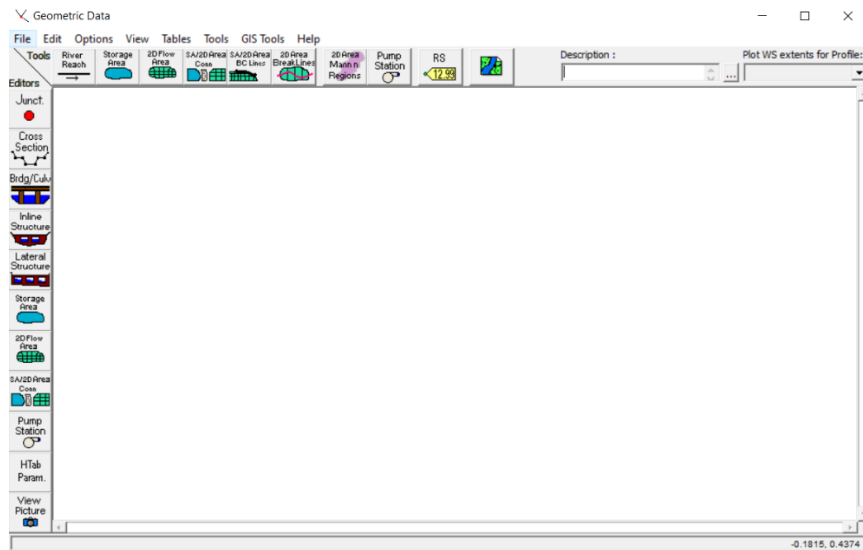


Figura 17 Ventana de Geometric Data

- ✓ Dé clic en el icono de *River Reach* (Figura 18) y el puntero del ratón se convertirá en un lápiz de tal manera que permitirá dibujar en la ventana de datos geométricos



Figura 18 Icono de river reach

- ✓ Seguido a esto dé un clic izquierdo en la parte superior izquierda de la ventana y trace una diagonal de tal manera que, en la parte inferior derecha, dará doble clic izquierdo (Figura 19)

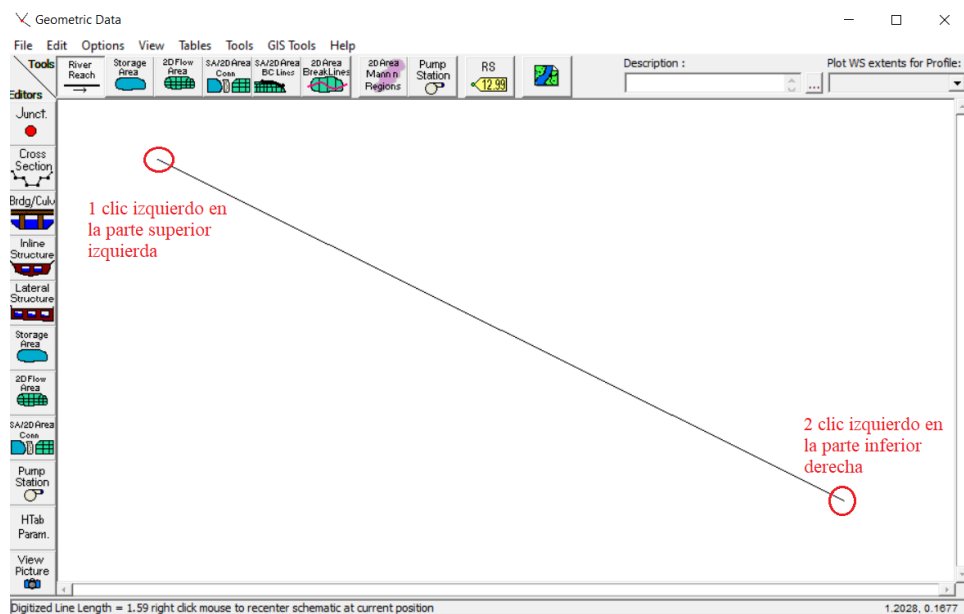


Figura 19 Ventana para el dibujo del tramo del río

- ✓ Al hacer doble clic izquierdo en la parte inferior derecha, aparecerá una ventana en la cual se nombrará el río y el canal. En *River* coloque el nombre de *Río* y en *Reach* coloque el nombre de *Canal* (Figura 20)

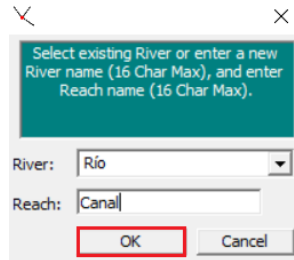


Figura 20 Ventana para nombrar el río y el canal

- ✓ Obtendrá el siguiente resultado (Figura 21)

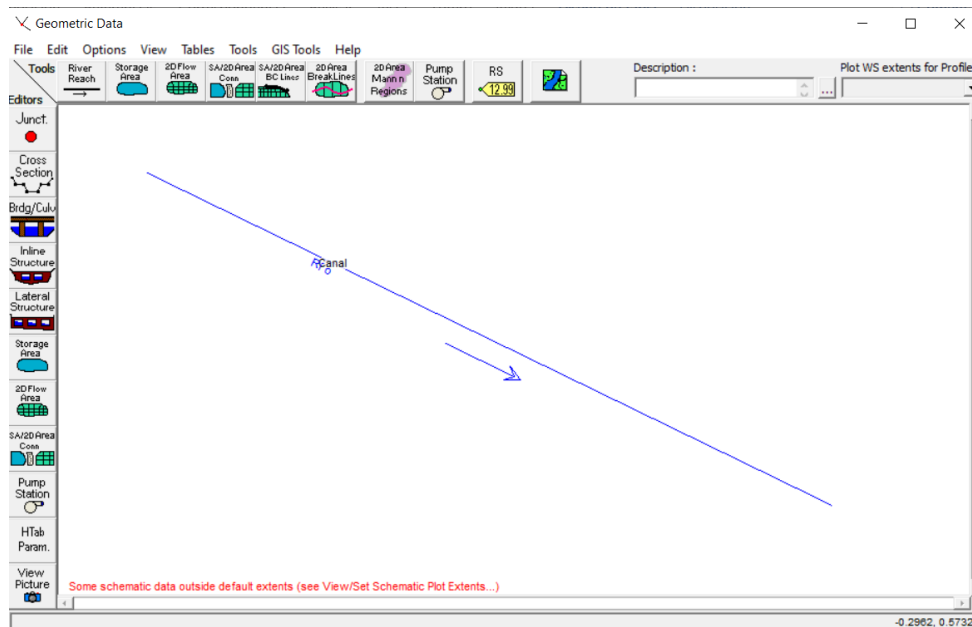


Figura 21 Ventana de creación del río en los datos geométricos

- ✓ Luego de esto seleccione la opción *Cross Section* y dé clic sobre este (Figura 22)



Figura 22 Icono de sección transversal

- ✓ Aparecerá la siguiente ventana en la cual podrá agregar datos de secciones transversales (Figura 23)

Cross Section Data

Exit Edit Options Plot Help

River: **Rio** Apply Data Plot Options ☐ Keep Prev XS Plots ☒ Plot Terrain (if available)

Reach: **Canal** River Sta.:

Description

Del Row	Ins Row	Station	Elevation
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

Downstream Reach Lengths

LOB	Channel	ROB

Manning's n Values

LOB	Channel	ROB

Main Channel Bank Stations

Left Bank	Right Bank

Cont'Exp Coefficient (Steady)

Contraction	Expansion

Select river for cross section editing

Figura 23 Ventana para ingresar los datos de sección transversal

- ✓ Dé clic en *Options>Add a new Cross Section (Figura 24)*

Cross Section Data

Exit Edit **Options** Plot Help

River: **Rio**

Reach: **Can**

Description

Del Row

Cross	Stat
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	

Edit Cross Se

Plot Options ☐ Keep Prev XS Plots ☒ Plot Terrain (if available)

No Data for Plot

Figura 24 Ventana para añadir una nueva sección transversal

- ✓ Se abrirá una nueva ventana emergente la cual solicita un indicativo para esta nueva sección transversal, en esta ventana coloque el número *1* ya que hace referencia a que es la primera sección transversal (Figura 25)

HEC-RAS

Enter a new river station for the new cross section in reach "Canal"

Figura 25 Ventana para la primera sección transversal

- ✓ Luego de esto se abrirá una nueva ventana similar a la mostrada en la *Figura 23*. Proceda a llenar los datos de la siguiente manera.
- ✓ En la sección de *Description* coloque *Sección 1*. Ya que hace referencia a que es la primera sección transversal (*Figura 26*)

Figura 26 Ventana de la descripción para la sección 1

- ✓ Luego, en la sección de *Downstream Reach Lengths*, coloque el valor de 5 ya que la distancia desde la sección 1 hasta la siguiente sección aguas abajo es de 5 metros (*Figura 27*)

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
5	5	5

Figura 27 Ventana de valores de distancia hasta la sección inmediata aguas abajo

- ✓ En la sección de *Cross Section Coordinates* coloque los valores que hacen referencia a la sección transversal (*Figura 28*)

Cross Section Coordinates		
	Station	Elevation
1	-1.22	2
2	-1.22	0
3	1.22	0
4	1.22	2
5		
6		
7		

Figura 28 Ventana con los datos de la Sección 1

- ✓ Cabe resaltar que los números y palabras aparecen en rojo ya que no se han aplicado los datos a la sección, pero esto se realizará más adelante
- ✓ En la sección de *Manning's n Values* se colocarán los valores del coeficiente de Manning en la sección de la siguiente manera (*Figura 29*)

Manning's n Values		
LOB	Channel	ROB
0.015	0.015	0.015

Figura 29 Valores del coeficiente de Manning

- ✓ Las secciones de LOB, Channel y ROB, hacen referencia a left over bank, canal principal y right over bank; es decir el valor de Manning a la izquierda del canal, en el centro del canal y a la derecha de este

En la sección de *Main Channel Bank Stations* ingresará los siguientes valores que se refieren a la necesidad del programa de establecer el canal principal por el cual correrá el fluido, la sección que queda fuera de esta zona es tomada como sobre ancho del canal, y sirve para estudios de inundación (*Figura 30*)

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
-1.22	1.22

Figura 30 Ventana para establecer el canal principal

- ✓ En la sección de *Cont/Exp Coefficient*, se encuentran los coeficientes de contracción y expansión. Estos coeficientes ocurren como una corrección al valor de la cabeza de velocidad cuando una sección se contrae (coeficiente de contracción), o cuando la sección se expande (coeficiente de expansión). Para más información puede dar clic en el icono de pregunta que se muestra en la *Figura 31*, y luego buscar en el **capítulo 2** del manual de HEC-RAS, la sección llamada *Contraction and Expansion Loss Evaluation*.
- ✓ En este caso se tomarán los coeficientes de contracción y expansión como cero (0), de tal manera que no ocurran correcciones al valor de la cabeza de velocidad cuando la sección aumente o disminuya de ancho (*Figura 31*)

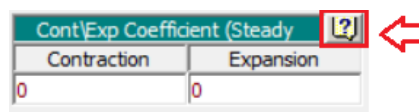


Figura 31 Ventana de los coeficientes de contracción y expansión

- ✓ Obtendrá una ventana como se muestra a continuación y dará clic en *Apply Data* para aplicar los datos. En la parte derecha de la ventana se puede observar la sección transversal dibujada (*Figura 32*)

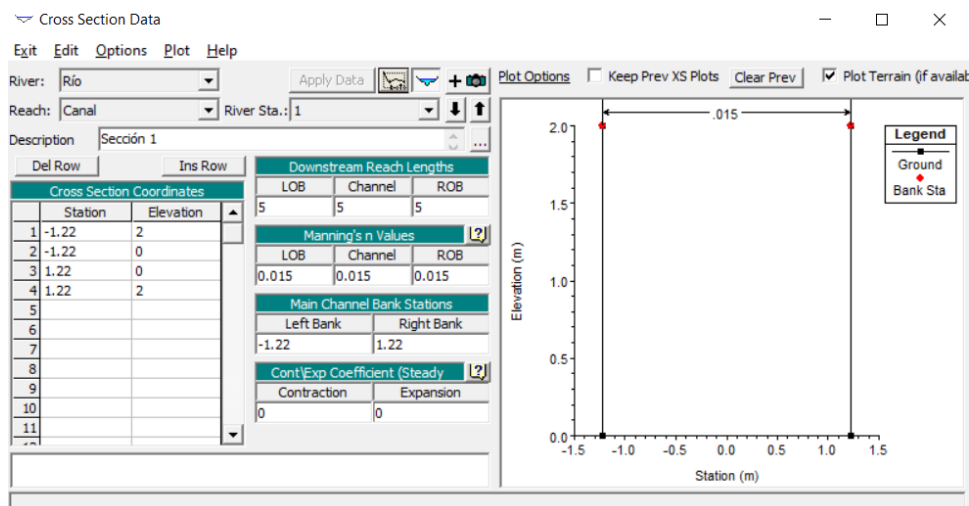


Figura 32 Ventana de la Sección 1

Segunda sección transversal

- ✓ Para crear la segunda sección transversal, estando en la ventana de la *Figura 32*, proceda a dar clic en *Options* y luego en *Copy Current Cross Section* (*Figura 33*)

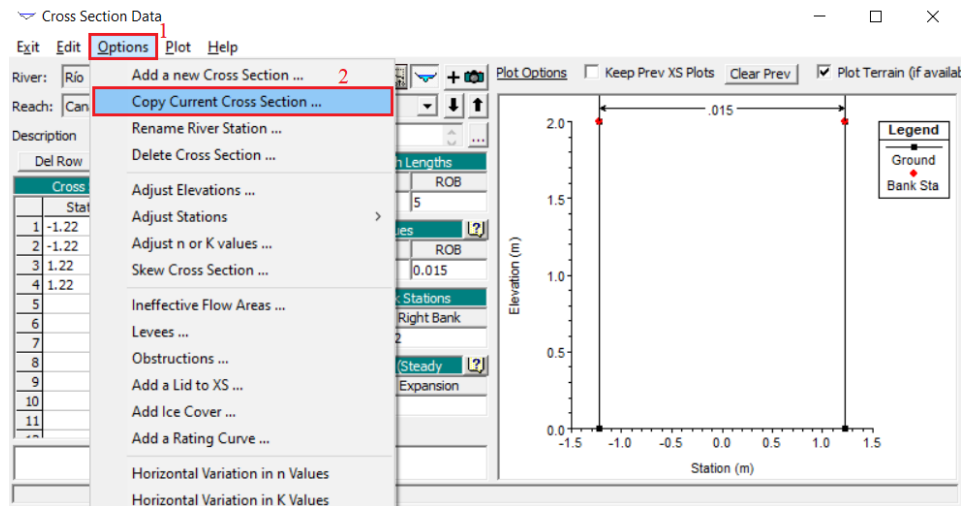


Figura 33 Ventana para copiar la actual sección transversal

- ✓ Luego de esto aparecerá una ventana en la que nuevamente se solicitará un indicativo para esta segunda sección transversal, en este caso se utilizará el número 2 (Figura 34)

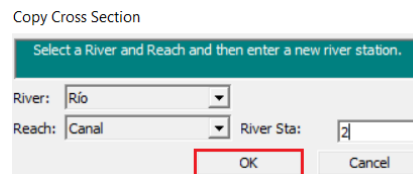


Figura 34 Ventana para el indicativo de la segunda sección transversal

- ✓ Para finalmente dar clic en *Ok*.
- ✓ Luego de esto aparecerá una nueva sección transversal, con los mismos datos de la sección 1, que deberá cambiar de la siguiente manera
- ✓ En la sección de *Description* coloque *Sección 2* (Figura 35)



Figura 35 Ventana para la descripción de la segunda sección transversal

- ✓ El ancho de la sección 2 es de 0.86 [m], por lo que se deben cambiar los valores en la sección de *Cross Section Coordinates*, de la siguiente manera (Figura 36)

Cross Section Coordinates		
	Station	Elevation
1	-0.43	2
2	-0.43	0
3	0.43	0
4	0.43	2

Figura 36 Ventana con los datos para la Sección 2

- ✓ En la sección de *Downstream Reach Lengths* coloque el valor de 7.65, ya que la sección inmediatamente aguas debajo de la sección 2, está a 7.65 metros de distancia como lo dicta el problema (Figura 37)

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
7.65	7.65	7.65

Figura 37 Ventana para definir la distancia hasta la sección aguas abajo

- ✓ La sección de *Manning's n Values* déjela igual que el de la sección 1 ($n=0.015$)
- ✓ La sección de *Main Channel Bank Stations*, cambiará debido a que el ancho del canal ha cambiado, ingrese los siguientes valores (Figura 38)

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
-0.43	0.43

Figura 38 Ventana con los valores de la sección *Main Channel Bank Stations*

- ✓ La sección de *Cont/Exp Coefficient* déjela igual que el de la sección 1 (0 para ambos)
- ✓ Dé clic en *Apply Data* después de haber realizado los cambios, y se encontrará con una ventana como se muestra en la Figura 39

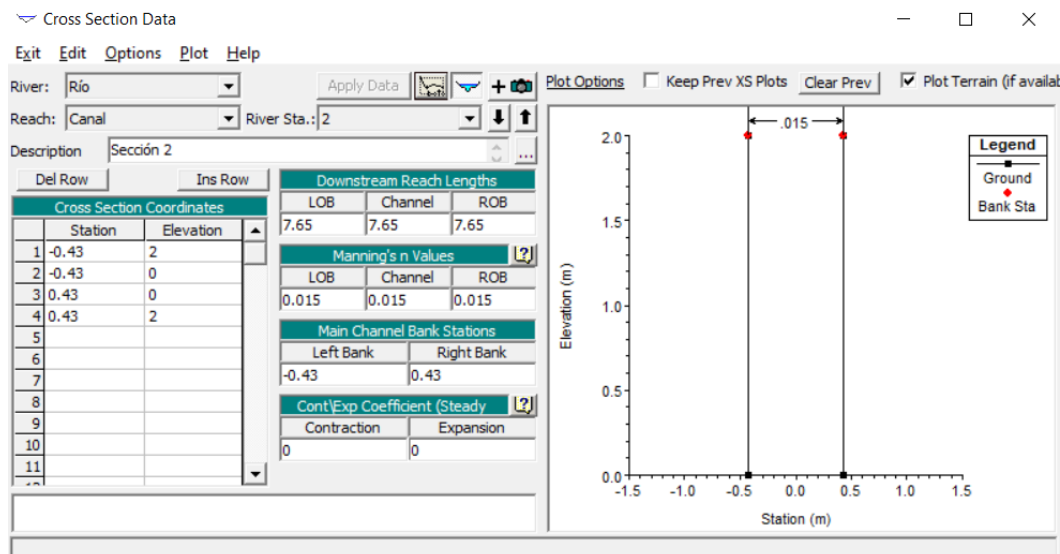


Figura 39 Ventana de la Sección 2

Tercera sección transversal

- ✓ Para esta nueva sección proceda a realizar una copia de la sección transversal como se muestra en la *Figura 33*
- ✓ En el número identificador de la posición relativa coloque 3 (*Figura 34*)
- ✓ En *Description* se coloca *Sección 3* (*Figura 35*)
- ✓ La sección 3 solo difiere de la sección 2 en un ancho de 3.05 metros, por lo cual deberá ajustar nuevamente la sección de *Cross Section Coordinates* de la siguiente manera (*Figura 40*)

Cross Section Coordinates		
	Station	Elevation
1	-1.525	2
2	-1.525	0
3	1.525	0
4	1.525	2

Figura 40 Ventana con los datos de la Sección 3

- ✓ La distancia entre las secciones 3 y 2 es de 7.65 (*Figura 37*)
- ✓ La sección de *Manning's n Values* déjela igual que el de la sección 1 ($n=0.015$)
- ✓ La sección de *Main Channel Bank Stations*, cambiará debido a que el ancho del canal ha cambiado, ingrese los siguientes valores (*Figura 41*)

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
-1.525	1.525

Figura 41 Ventana con los valores de la sección *Main Channel Bank Stations*

- ✓ La sección *Cont/Exp Coefficient* déjela igual que el de la sección 1 (0 para ambos)
- ✓ Los cambios respectivos para la sección 3, se ven en la *Figura 42*

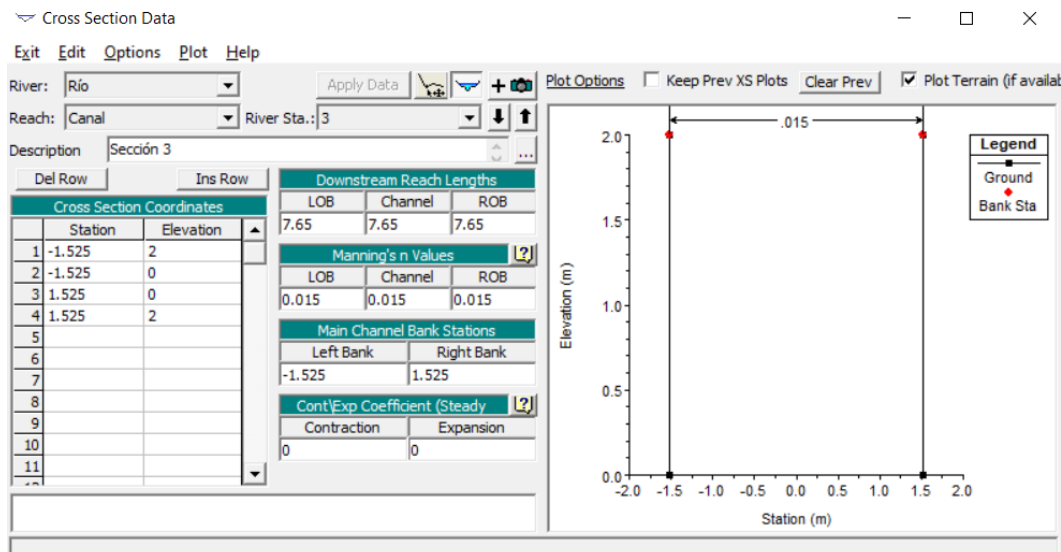


Figura 42 Ventana de la Sección 3

- ✓ Cierre la ventana presente en la *Figura 42*
- ✓ Obtendrá una ventana como se muestra en la *Figura 43*

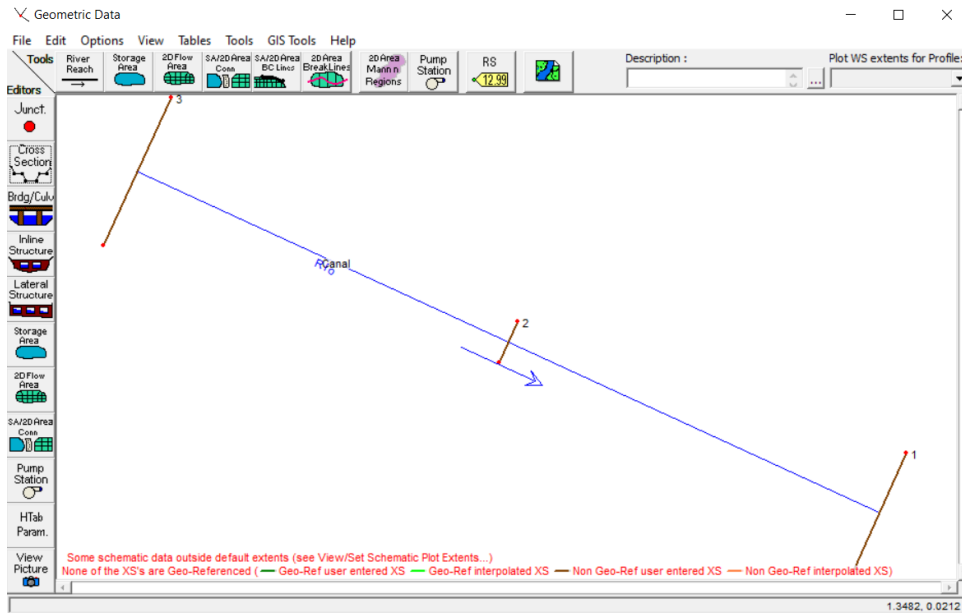


Figura 43 Ventana final de los datos geométricos

5.2.4 Interpolación de las secciones transversales

- ✓ Cuando se encuentre en la ventana de la *Figura 43*, dé clic en *Tools>XS Interpolation>Between 2 XS's* (*Figura 44*)

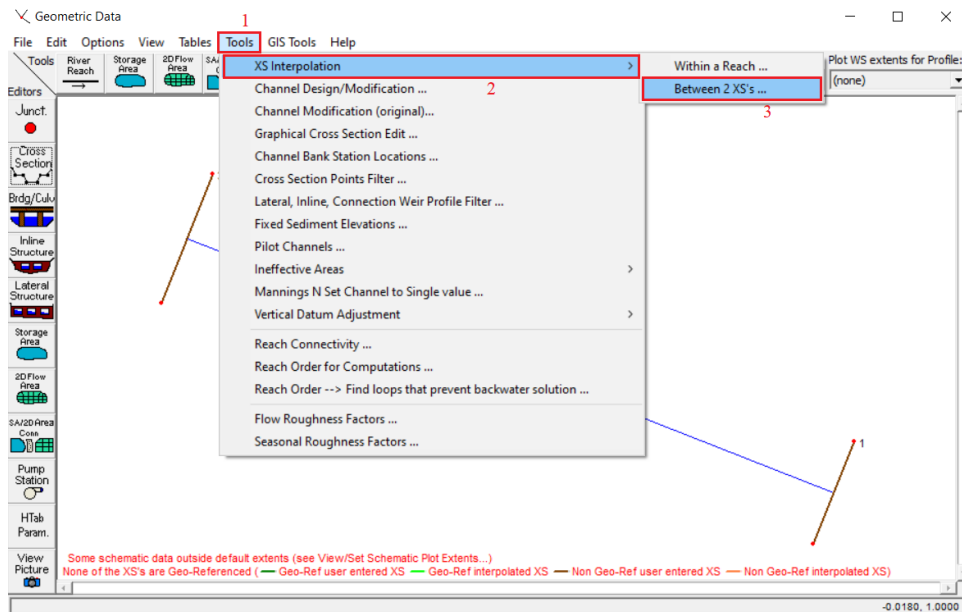


Figura 44 Ventana para realizar la interpolación

- ✓ Aparecerá la siguiente ventana en la cual se asegurará que en la sección que dice *Upper Riv Sta* tenga el valor de 3 (esto permitirá ubicar la sección 3 e inmediatamente aguas abajo tendrá la sección 2 para realizar la interpolación), si esta sección no tiene el valor de 3, puede cambiarlo utilizando el botón con una flecha que se muestra en la *Figura 45*
- ✓ Y en la sección que dice *Maximum Distance (m)* coloque el valor de 0.5 (para realizar interpolaciones cada 0.5 metros)
- ✓ Luego de esto haga clic en *Interpolate New XS's* como se muestra en la *Figura 45*

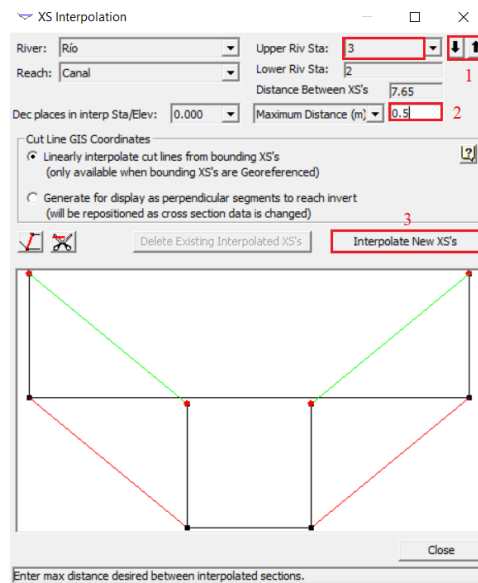


Figura 45 Ventana para las interpolaciones entre las secciones 3 y 2

- ✓ Se realizará el mismo procedimiento entre las secciones 2 y 1, para esto vuelva a seguir los pasos anteriores y obtendrá una ventana igual a la expuesta en la *Figura 46*

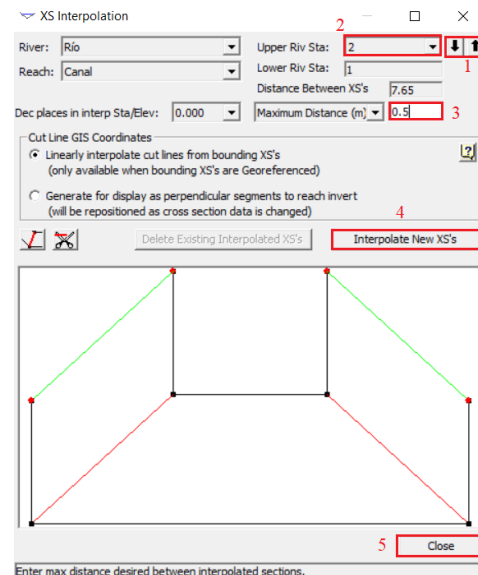


Figura 46 Ventana para las interpolaciones entre las secciones 2 y 1

- ✓ Finalmente dé clic en *Close* (Figura 46)
- ✓ Para el guardado de los datos geométricos proceda a dar clic en *File* y luego en *Save Geometry Data* (Figura 47)

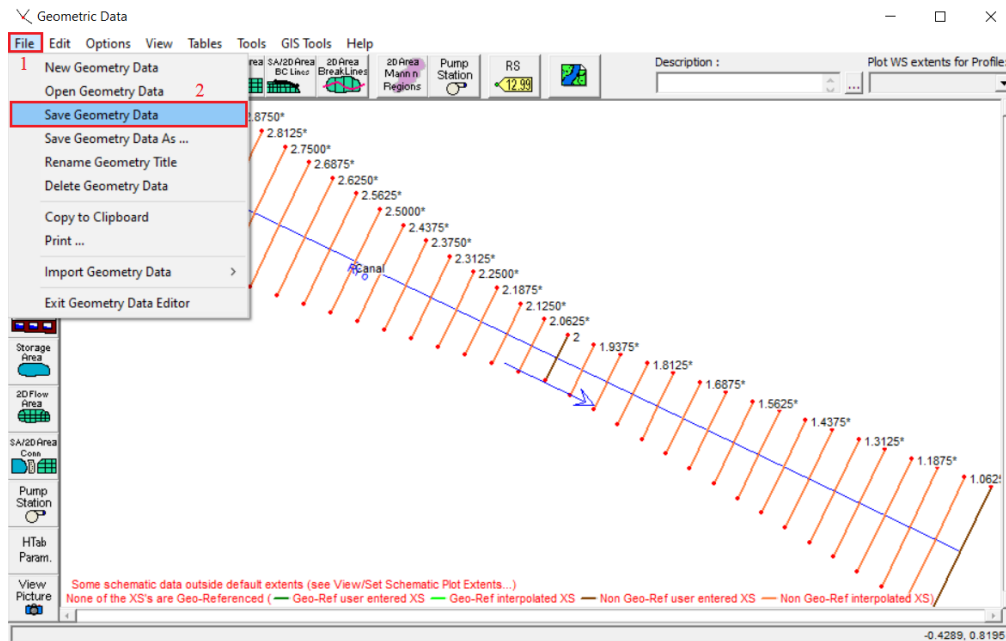


Figura 47 Ventana para el guardado de los datos geométricos

- ✓ Aparecerá la siguiente ventana en la cual deberá ingresar el título de *Geometría_3* para finalmente dar clic en *Ok* (Figura 48)

Save Geometry Data As

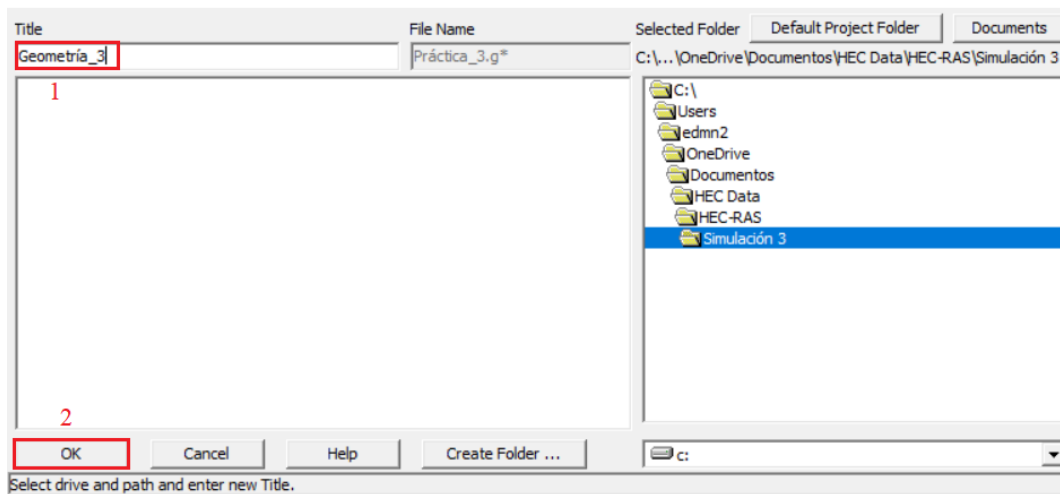


Figura 48 Ventana del guardado de los datos geométricos

- ✓ Al final volverá a la ventana que se muestra en la Figura 43, pero con los datos geométricos guardados (Figura 49)

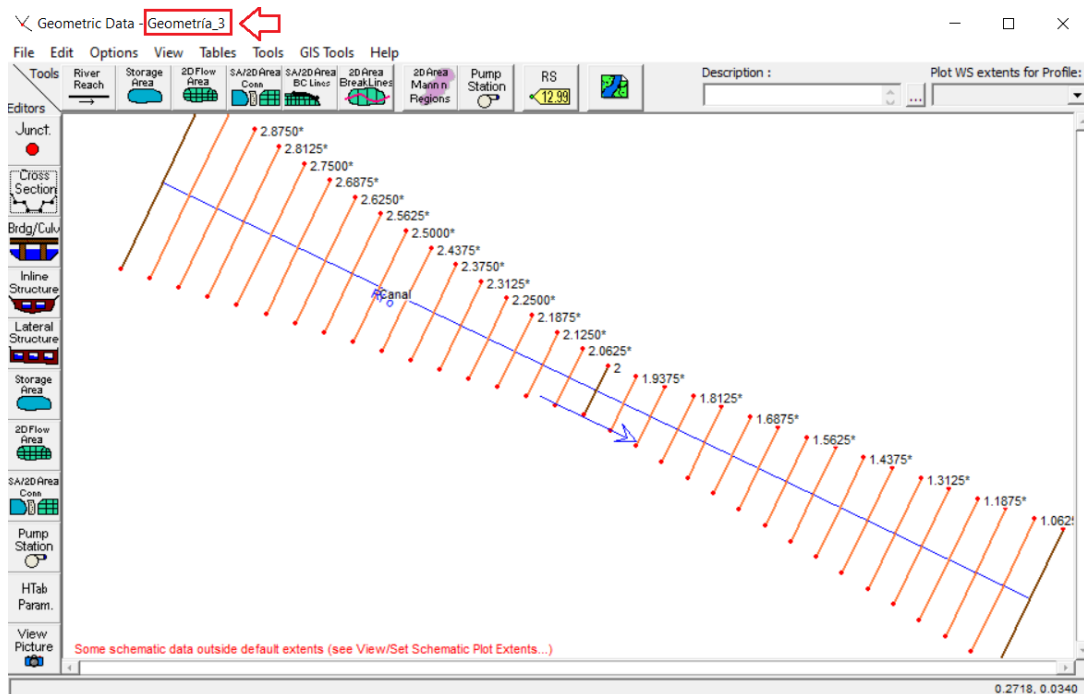


Figura 49 Ventana con los datos geométricos guardados

- ✓ Proceda a cerrar la ventana presentada en la *Figura 49* y se le presentará la siguiente ventana del programa HEC-RAS (*Figura 50*)

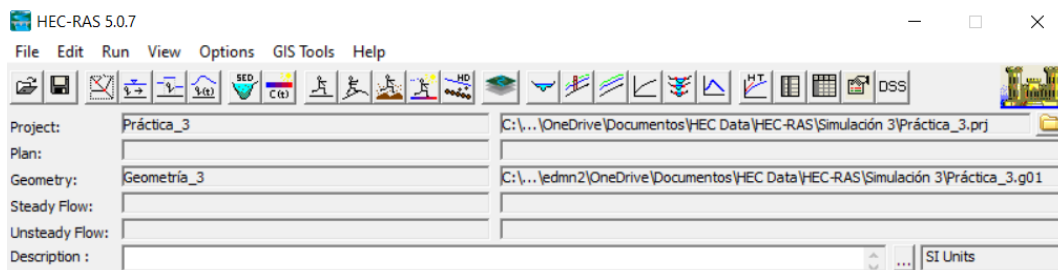


Figura 50 Ventana de HEC-RAS con los datos geométricos guardados

5.2.5 Datos del flujo

En este punto, se procederá a ingresar el valor del caudal y las condiciones de contorno que para este caso será la pendiente. Hay que tener en cuenta que a la hora de ingresar valores en el programa HEC-RAS, se deben tener en cuenta, una serie de reglas en el ingreso de las condiciones de contorno que se pueden consultar a profundidad en la siguiente página web:

- ✓ Página de Hidrojing (*Condiciones de contorno en HEC-Ras, simulación en régimen permanente* - Hidrojing, 2013): www.hidrojing.com

Datos del flujo

- ✓ Para ingresar los datos del flujo, dé clic en el icono de *Steady Flow Data*, de la ventana principal de HEC-RAS (Figura 51)

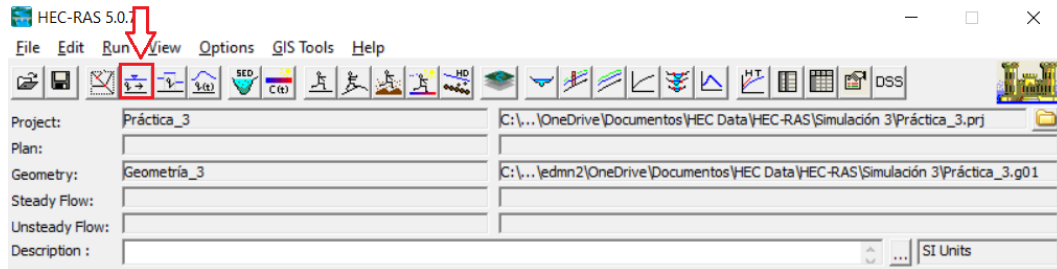


Figura 51 Ventana del programa HEC-RAS y el icono Steady Flow Data

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la cual procederá a ingresar el valor del caudal que es de 2.83 [m3/s]. Dé clic en *Apply Data* y finalmente dé clic en *Reach Boundary Conditions* (Figura 52)

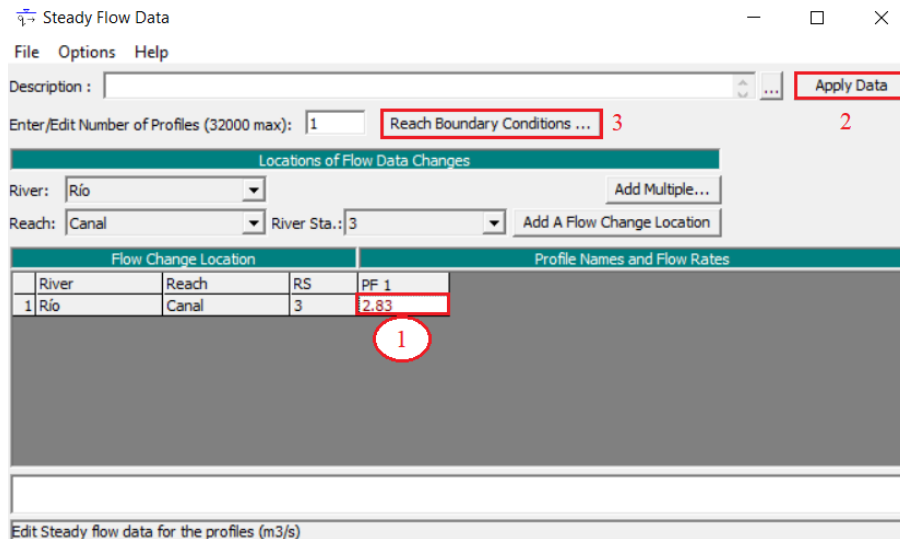


Figura 52 Ventana para el ingreso del valor del caudal

- ✓ Se abrirá una nueva ventana de condiciones de contorno, y si se ha leído la página web que se especificó en esta sección al comienzo (**5.2.5 Datos del flujo**), se encontrará que cuando se realizan simulaciones en flujo mixto en HEC-RAS, las condiciones de contorno deben establecerse tanto en la sección aguas arriba como la sección aguas abajo del canal (Figura 53)

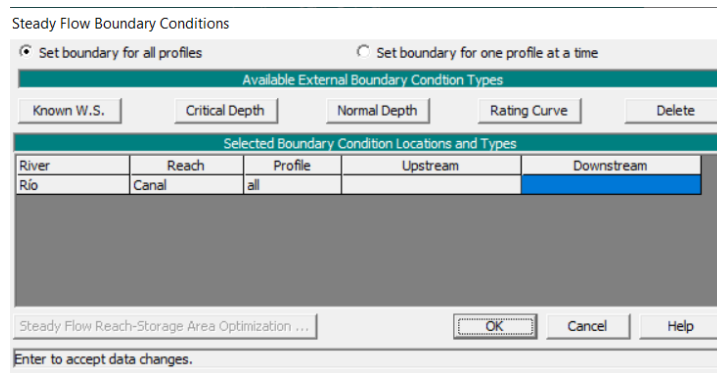


Figura 53 Ventana de condiciones de contorno para flujo uniforme

- ✓ En *Reach Boundary Conditions* dé clic en la casilla inmediatamente debajo de *Upstream*, esta casilla se rellenará de azul, y luego de clic en el botón de *Known W.S* (Figura 54)

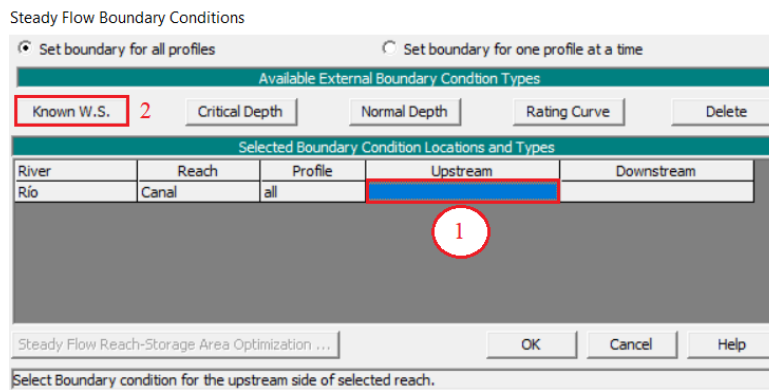


Figura 54 Ventana para ingresar las condiciones de contorno aguas arriba

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la cual introducirá el valor de la cota de la superficie del agua, este valor se mencionó en la descripción del problema y es de 1.524 [m], para finalmente dar clic en *OK* (Figura 55)

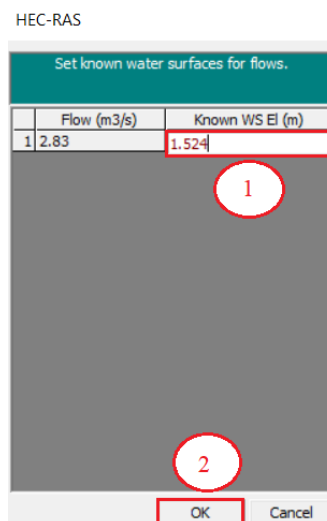


Figura 55 Ventana para ingresar la pendiente aguas arriba

- ✓ Repita el proceso seleccionando la casilla inmediatamente debajo de *Downstream*, seleccione *Known W.S*, e ingrese el valor de 0.2286 [m] (Figura 56)

HEC-RAS

Set known water surfaces for flows.

	Flow (m3/s)	Known WS El (m)
1	2.83	0.2286

1

2

OK Cancel

Figura 56 Ventana para ingresar la pendiente aguas abajo

- ✓ Volverá a la ventana mostrada en la Figura 57, para finalmente dar clic en *Ok*

Steady Flow Boundary Conditions

Set boundary for all profiles Set boundary for one profile at a time

Available External Boundary Condition Types

Known W.S. Critical Depth Normal Depth Rating Curve Delete

Selected Boundary Condition Locations and Types

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
Río	Canal	all	Known WS	Known WS

1

Steady Flow Reach-Storage Area Optimization ... OK Cancel Help

Select Boundary condition for the downstream side of selected reach.

Figura 57 Ventana donde se finalizan las condiciones de contorno

- ✓ Volverá a la ventana mostrada en la Figura 52. Es aquí donde dará clic en *File* y luego en *Save Flow Data* (Figura 58)

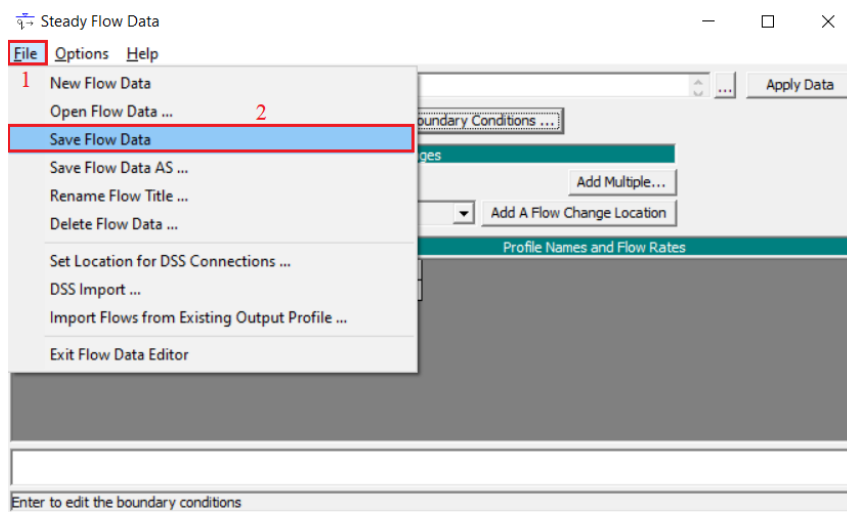


Figura 58 Ventana para el guardado de los datos del flujo

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la cual pondrá como nombre a los datos del flujo *Flow_3* para luego dar clic en *Ok* (Figura 59)

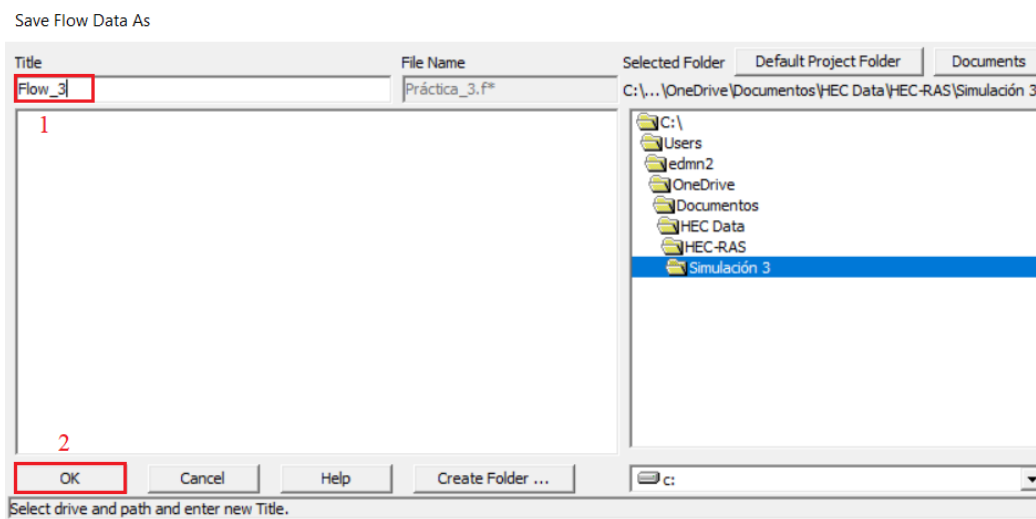


Figura 59 Ventana del guardado final de los datos de flujo

- ✓ Volverá a una ventana como se muestra en la Figura 52 y la cerrará, resultando en la ventana de la Figura 60

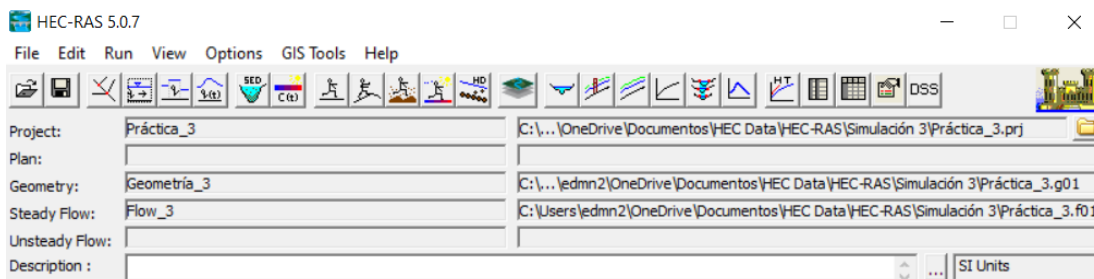


Figura 60 Ventana principal de HEC-RAS con los datos de flujo asociados

- ✓ De esta manera ya tiene configurada la geometría del problema y los datos de flujo asociados a este.

5.2.6 Plan de la simulación

Para realizar el plan de la simulación hay que tener en cuenta que es un flujo mixto y se realizará de la siguiente manera:

- ✓ Dé clic en el icono de *Perform a Steady Flow Simulation* (Figura 61)

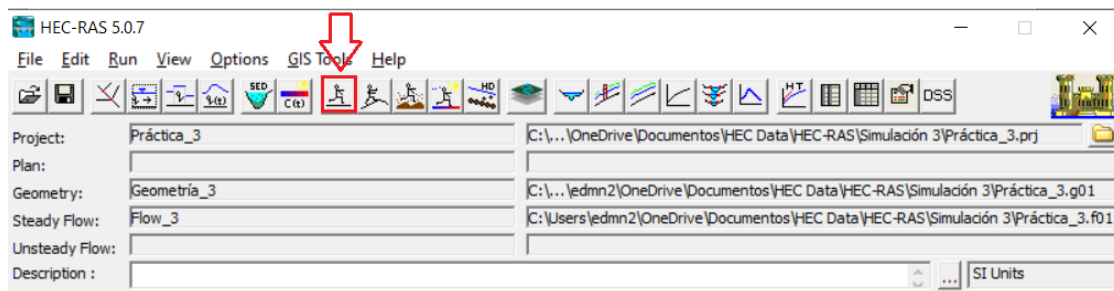


Figura 61 Ventana del programa HEC-RAS y el icono de Perform a Steady Flow Simulation

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la cual se asegurará que el régimen del flujo sea *Mixed* (Figura 62)

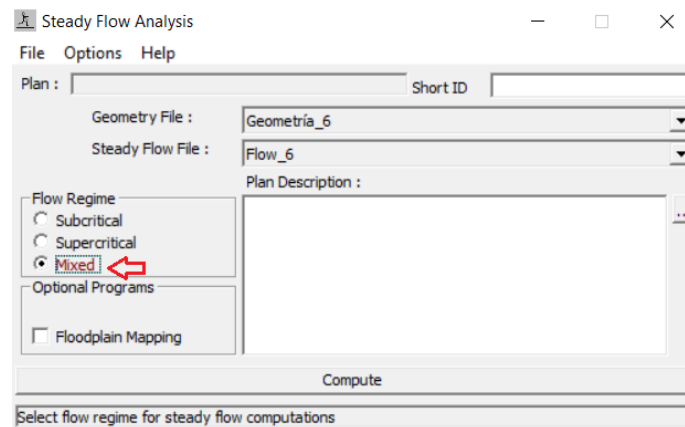


Figura 62 Ventana del análisis del flujo permanente con el régimen mixto

- ✓ Luego dé clic en *File>Save Plan* (Figura 63)

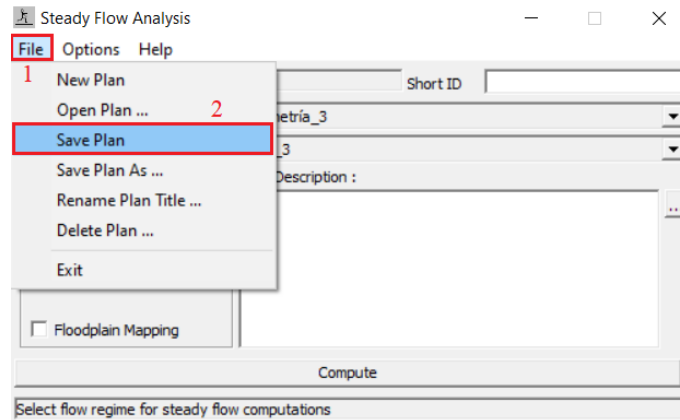


Figura 63 Ventana para el guardado del plan de análisis en flujo permanente

- ✓ Ingrese el nombre del plan “Plan_3” para luego hacer clic en “Ok” (Figura 64)

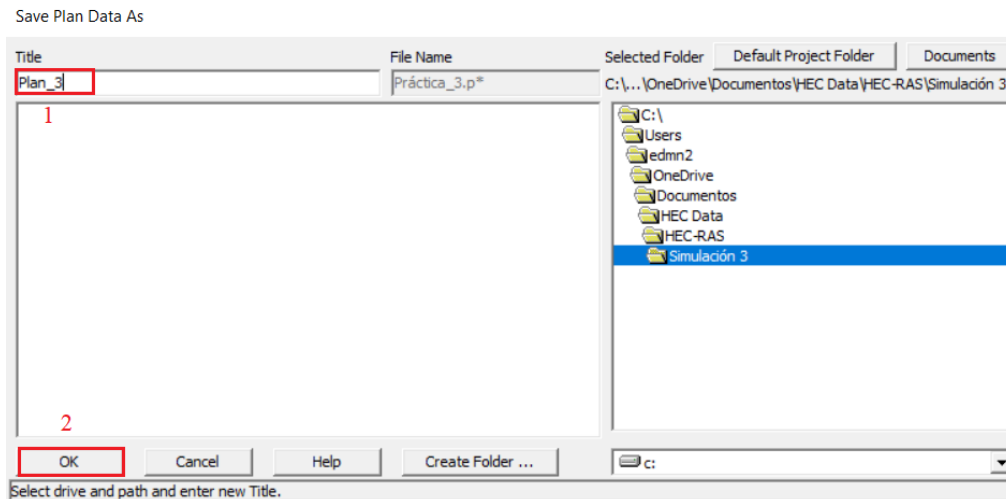


Figura 64 Ventana del guardado del plan de análisis para flujo permanente

- ✓ Aparecerá una ventana emergente en la cual le requiere ingresar un valor de identificador, para este caso ingrese el valor de “01” y dará clic en “Ok” (Figura 65)

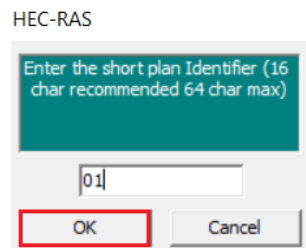


Figura 65 Ventana para el indicativo del plan a realizar

- ✓ Deberá regresar a la ventana mostrada en la Figura 66, en donde dará clic en *Compute*

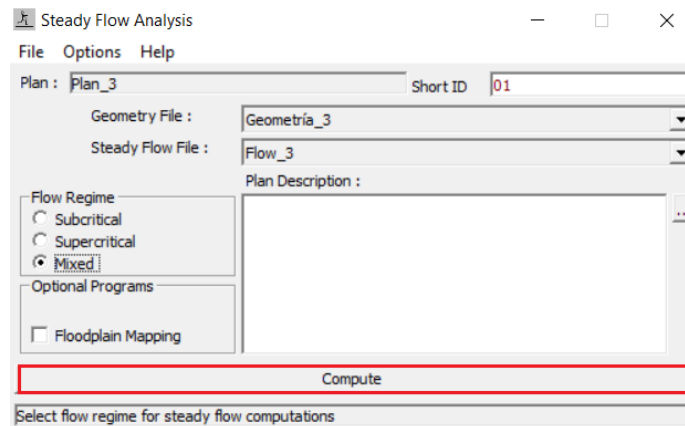


Figura 66 Ventana del plan de análisis para flujo permanente en régimen subcrítico final

Finalmente aparecerá un recuadro donde se evidenciará el avance de la simulación. Al finalizar el proceso dé clic en el icono de *Close* (Figura 67)

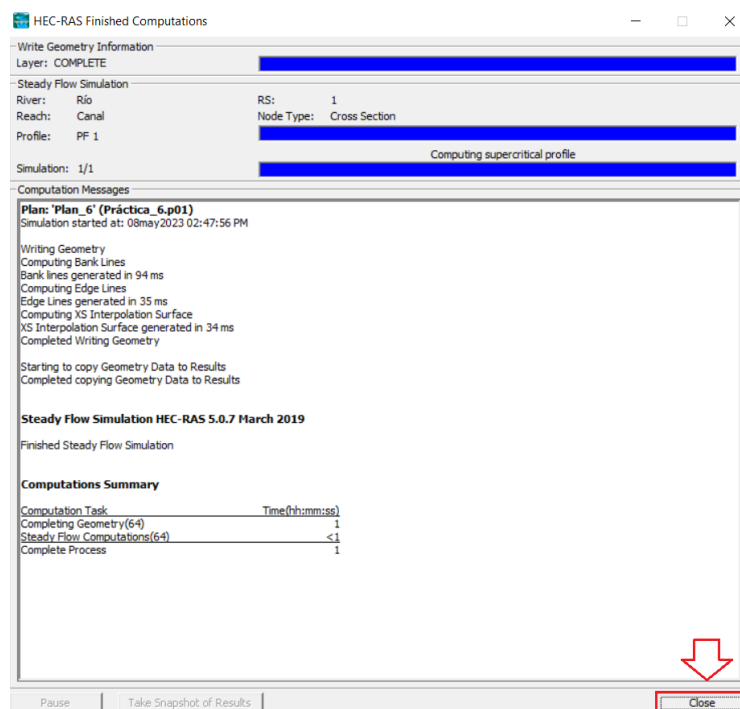


Figura 67 Ventana de computación de la simulación

Nota: Si desea realizar modificaciones en las condiciones de la simulación, solo debe cambiar los datos que desee editar (geometría, flujo, condiciones de frontera, etc), guardar esos datos y luego computar nuevamente el proyecto.

5.2.7 Presentación de resultados

Para conocer los resultados de la simulación, desarrolle el siguiente procedimiento:

- ✓ Regrese a la ventana inicial de HEC-RAS (Figura 68) y proceda a ubicar las diferentes herramientas que tiene para la visualización de resultados (Figura 69)

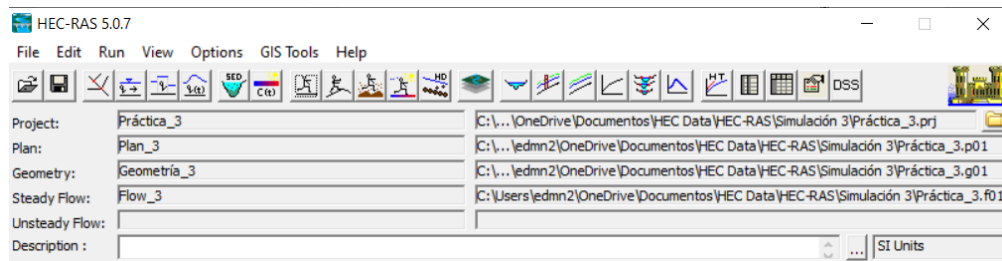


Figura 68 Ventana de HEC-RAS con los datos del plan de simulación añadidos



Figura 69 Iconos de los comandos principales de HEC-RAS

- ✓ Resultados de las secciones transversales (Figura 70)



Figura 70 Secciones transversales

- ✓ Resultados del perfil longitudinal (Figura 71)



Figura 71 Perfil longitudinal

- ✓ Resultados de la vista 3D del canal (Figura 72)



Figura 72 Vista 3D

- ✓ Tabla resumen de los resultados (Figura 73)



Figura 73 Tabla resumen

Importante: Con el ánimo de no extender tanto este documento, la explicación de cómo obtener y visualizar los resultados se explicará a detalle en el video que enmarca el proceso realizado en esta guía.

5.2.8 Guardado final del proyecto

- ✓ Finalmente, para guardar todo el proyecto y demás componentes de este, dé clic en *File>Save Project* (Figura 74)



Figura 74 Guardado final del proyecto en HEC-RAS

5.3 Video de la simulación

A continuación, se presentará el enlace del video que hace referencia a la simulación número tres presentada en este documento. Este video forma parte de una serie de tutoriales que ayudan al usuario en el manejo del programa computacional abordado en cada una de las simulaciones.

Enlace del video: <https://www.youtube.com/watch?v=A1M0Jw-BAsk>

6. Descripción del entregable

6.1 Entregables de la simulación inicial

Debe entregar en archivo PDF un documento donde se realice una captura de toda la pantalla (no solo una sección del programa computacional sino **TODA LA PANTALLA DEL ESCRITORIO**) de los siguientes pasos durante el proceso.

- ✓ El guardado del proyecto como se muestra en la *Figura 12*
- ✓ Las secciones transversales finales presentadas en la *Figura 32*, *Figura 39* y *Figura 42*
- ✓ Las secciones transversales interpoladas como se muestra en la *Figura 47*
- ✓ El guardado de los datos geométricos como se muestra en la *Figura 48*
- ✓ La ventana que muestra las especificaciones para las condiciones de contorno, presentada en la *Figura 57*
- ✓ El guardado de los datos del flujo presentado en la *Figura 59*
- ✓ El guardado del plan de simulación presentado en la *Figura 64*
- ✓ Los resultados obtenidos al ver el video de la simulación que se obtienen de la *Figura 70*, *Figura 71*, *Figura 72* y *Figura 73*

6.2 Preguntas de análisis

Desarrolle las siguientes preguntas sustentando **las respuestas necesarias** con los resultados obtenidos después del proceso de simulación en HEC-RAS.

1. Realice una pequeña conceptualización de lo que comprende por canales no prismáticos, teniendo en cuenta el contenido teórico presentado en este documento.
2. Lleve a cabo un análisis de signos como el que se desarrolló en la sección **4.3.1** de este documento, con el cual se quiere comprender el comportamiento del fluido entre las secciones 3 y 2; de tal manera que logre evidenciar la relación entre los resultados obtenidos con la simulación entre estas dos secciones y la ecuación 13 presentada en este documento. Añada conclusiones de lo observado.
3. Realizando una inspección de los resultados obtenidos desde la *Figura 70* hasta la *Figura 73*, exponga conclusiones de lo observado, explicando de forma detallada qué se está presentando en cada gráfica/tabla de resultados. Tenga en cuenta los conceptos teóricos y las ecuaciones formuladas.

7. Referencias Bibliográficas

- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*.
https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTO
S
- Condiciones de contorno en HEC-Ras, simulación en régimen permanente—Hidrojing*. (2013, marzo 25). <https://www.hidrojing.com/condiciones-de-contorno-en-hec-ras/>
- HEC-RAS*. (2008, marzo). <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Marbello, R. (2005). 4. *Medidores en régimen crítico*. Universidad Nacional de Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21725/3353962.2005.Parte%208.pdf?sequence=5&isAllowed=y>