

## **Manual de laboratorio de simulación computacional**

### **Práctica N°6: Evaluación del Flujo Gradualmente Variado Mediante el Cambio de Pendiente**

**Fuente del recurso:** Adaptado del libro Hidráulica de Canales (Villón, 1995) por el estudiante Eliel David Malaver Nieto en el desarrollo de su trabajo de grado

#### **1. Objetivos de la simulación**

- ✓ Comprender los conceptos del flujo gradualmente variado y las curvas de remanso en canales abiertos, mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional HEC-RAS
- ✓ Aplicar los conceptos adquiridos sobre el flujo gradualmente variado y las curvas de remanso, mediante el desarrollo de un ejemplo orientador utilizando el programa HEC-RAS
- ✓ Evaluar y fortalecer la comprensión de los conceptos del flujo gradualmente variado y las curvas de remanso 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 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

La sexta práctica del laboratorio de hidráulica tiene como objetivo estudiar el flujo gradualmente variado, aquel que se caracteriza por la variación suave del tirante del agua (y con ello del área, la velocidad, etc.) a lo largo del canal, y se presenta situaciones en las que las condiciones geométricas de la sección transversal o del fondo del canal cambia abruptamente, como en la llegada o salida de estructuras hidráulicas tales como represas, compuertas, vertederos, entre otras (Villón, 1995).

A diferencia del flujo uniforme, donde los componentes longitudinales de peso y fricción se balancean, en el flujo gradualmente variado existe un desbalance entre estos dos componentes; en consecuencia, las pendientes de la línea de energía, superficie del agua y fondo del canal no son paralelas, lo cual constituye un caso especial de estudio para la asignatura de Hidráulica de Canales.

Para cumplir el propósito de esta práctica, se utilizará HEC-RAS, una herramienta de modelado hidráulico que permite simular diferentes escenarios de flujo, entre ellos el flujo gradualmente variado en un canal. De este modo, se llevará a cabo un ejemplo, donde se simulará un flujo que circula por una pendiente suave, y cambia abruptamente a una pendiente fuerte, lo que representa un caso especial del flujo gradualmente variado. Así, los estudiantes podrán analizar este caso y responder una serie de preguntas que les permitirán ampliar sus conocimientos acerca del flujo gradualmente variado.

## 4. Marco teórico

### 4.1 El Flujo gradualmente variado (FGV)

El flujo gradualmente variado (FGV) es considerado un flujo permanente no uniforme pues su profundidad varía gradualmente a lo largo del canal para un caudal dado. El perfil de flujo que se produce (la variación de la profundidad del agua a lo largo del canal) resulta de la combinación de parámetros tales como la sección transversal, la pendiente longitudinal y el coeficiente de rugosidad (Marbello, 2005).

Las consideraciones para el análisis del FGV son las siguientes:

- ✓ El flujo es permanente
- ✓ Rugosidad del canal constante
- ✓ El coeficiente de Coriolis ( $\alpha$ ) es constante a lo largo del flujo (distribución de velocidades es similar entre dos secciones vecinas)
- ✓ La pendiente longitudinal del canal ( $S_o$ ) es constante y pequeña (se asumen líneas de corriente paralelas pues el cambio en la altura del agua es suave).
- ✓ Las pérdidas del sistema se deben principalmente a la fricción entre el agua y los bordes sólidos del canal creando una curva de caída de energía suave.
- ✓ La distribución de presiones en la sección transversal del canal sigue la ley hidrostática de presiones.
- ✓ Es un flujo acelerado (la sección transversal cambia; velocidad media cambia a lo largo del canal).
- ✓ Las pendientes del fondo ( $S_o$ ), superficie del agua ( $S_w$ ) y línea de energía  $S_f$  **NO** son paralelas.

### 4.2 Expresión para el flujo gradualmente variado

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, a continuación, se realiza una serie de planteamientos que permitirán obtener expresiones que caractericen el comportamiento del flujo gradualmente variado mediante la obtención de la altura del tirante hidráulico y la velocidad en una sección a lo largo del canal de estudio.

Para esto, se parte de la ecuación de energía la cual expresa lo siguiente:

$$H = Z + y + \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

Donde:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Reemplazando (2) en (1):

$$H = Z + E \quad (3)$$

Como en el FGV hay cambio de profundidad en el espacio, se deriva H con respecto a x:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dZ}{dx} + \frac{d}{dx} \left( y + \frac{V^2}{2g} \right) \quad (4)$$

Se define a  $S_f$  como la pendiente de la línea de energía a lo largo del canal:

$$\frac{dH}{dx} = -S_f \quad (5)$$

Es negativa debido a que hay disminución de energía útil en el sentido del escurrimiento (Villón, 1995).

Se define una pendiente favorable de la siguiente manera:

$$\frac{dZ}{dx} = -S_o \quad (6)$$

$S_o$  es la pendiente longitudinal del fondo del canal. Esta puede ser positiva, negativa o cero.

- Para  $S_o = 0$  el fondo del canal es horizontal.
- Si  $S_o < 0$ , existe un pendiente favorable, aquellos casos en que la elevación del fondo del canal disminuye en el sentido del flujo. (Canales tipo M, C y S) (Marbello, 2005).

Así, reemplazando (5) y (6) en (4):

$$-S_f = -S_o + \frac{dE}{dx} \quad (7)$$

Por la regla de la cadena se obtiene:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dE}{dy} * \frac{dy}{dx} \quad (8)$$

Por lo tanto:

$$\frac{dE}{dy} = \frac{d}{dy} \left[ y + \frac{Q^2}{2gA^2} \right] \quad (9)$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{Q^2}{2g} (-2 * A^{-3}) * \frac{dA}{dy} \quad (10)$$

Para canales trapezoidales se tiene que:

$$A = (b + zy)y \quad (11)$$

Donde  $b$  es el ancho del canal,  $z$  es el valor del talud y  $y$  es la altura del agua; siguiendo con el procedimiento:

$$\frac{dA}{dy} = \frac{d}{dy} (by + zy^2) \quad (12)$$

$$\frac{dA}{dy} = b + 2zy \quad (13)$$

Para una sección trapezoidal se tiene que el ancho superficial es igual a:

$$T = b + 2zy \quad (14)$$

Resultando en que la deriva respecto a la altura del agua es igual al ancho superficial, para secciones trapezoidales.

$$\frac{dA}{dy} = T \quad (15)$$

Teniendo en cuenta la relación de la ecuación 15 y al reemplazarla en la ecuación 10 se tiene:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2 T}{g A^3} \quad (16)$$

Recuerde que:

$$FR^2 = \frac{V^2}{g * Dh} \quad (17)$$

$$Dh = \frac{A}{T} \quad (18)$$

$$FR^2 = \frac{Q^2 T}{g A^3} \quad (19)$$

De este modo se obtiene:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - FR^2 \quad (20)$$

Por lo tanto:

$$S_o - S_f = \frac{dy}{dx} * (1 - FR^2) \quad (21)$$

Finalmente:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - FR^2} \quad (22)$$

La anterior expresión corresponde a la ecuación de la dinámica del flujo gradualmente variado, la cual se puede aplicar para canales con pendiente favorable con sección transversal trapezoidal, y por un procedimiento similar se llega a la misma expresión para secciones rectangulares.

A partir de la ecuación 22, se pueden definir distintos comportamientos de la superficie libre o perfiles de flujo (también llamas curvas de remanso, las cuales se explicarán posteriormente). Al observar la ecuación 22, se encuentra que partió de suponer que la pendiente del fondo del canal era favorable, es decir aquellos canales cuya elevación del fondo disminuye en el sentido del flujo. Sin embargo, también se pueden encontrar canales con pendientes nulas y con pendientes de fondo positivas. Para estos casos particulares también existen ecuaciones asociadas a ello, que se podrán encontrar en los documentos que se presentan como referencias bibliográficas.

## 4.3 Condiciones normales y ecuación de la pendiente crítica

### 4.3.1 Condiciones normales del flujo

Las condiciones normales de flujo están ligadas al flujo uniforme y permanente; de allí los términos tirantes normal ( $y_n$ ), velocidad normal ( $V$ ), pendiente normal ( $S_o$ ), etc (Villón, 1995).

Además de esto, recuerde que, para las condiciones del flujo uniforme y permanente, se pueden utilizar las ecuaciones de Chèzy, Manning, entre otras. De la ecuación de Manning se tiene que:

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} S_o^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (23)$$

Donde:

$V$ : Es la velocidad en flujo uniforme ( $m/s$ )

$R$ : Es el radio hidráulico ( $m$ )

$S_o$ : Es la pendiente normal del canal ( $m/m$ )

$n$ : Es el coeficiente de rugosidad de Manning ( $s/m^{1/3}$ )

A su vez, la ecuación de Manning para el caudal tiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{R^{2/3} S_o^{1/2}}{n} * A \quad (24)$$

Donde el caudal está dado  $Q$ , y  $A$  representa el área de la sección transversal.

De la ecuación 23, se puede obtener una expresión para la pendiente normal del canal:

$$S_o = \left( \frac{Vn}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (25)$$

O también a partir de la ecuación 24 se tiene:

$$S_o = \left( \frac{Q * n}{R^{2/3} * A} \right)^2 \quad (26)$$

✓ Para encontrar el valor del **tirante normal** ( $y_n$ ), se parte de la ecuación de Manning para caudal (ecuación 24):

$$Q = \frac{R^{2/3} S_o^{1/2}}{n} * A \quad (27)$$

Luego de esto se despejan las variables que deben ser conocidas como lo es el caudal, el valor de la rugosidad y la pendiente del canal; dejando al otro extremo de la igualdad las condiciones geométricas del canal, siendo esto:

$$\frac{Qn}{S_o^{1/2}} = R^{2/3} A \quad (28)$$

Dependiendo de la sección transversal a utilizar, se despejan los valores del radio hidráulico y del área mojada de tal manera que queden en función de la altura del flujo y esta será, la altura normal  $y_n$  que se halla bajo condiciones de flujo uniforme.

Para el caso de secciones trapezoidales se tiene que:

$$R = \frac{A}{P} \quad (29)$$

$$A = (b + zy)y \quad (30)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2} \quad (31)$$

Por lo tanto:

$$R = \frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}} \quad (32)$$

Reemplazando las ecuaciones 30 y 32 en la ecuación 28 se tiene que:

$$\frac{Qn}{S_o^{\frac{1}{2}}} = \left[ \frac{(b + zy_n)y_n}{b + 2y_n\sqrt{1 + z^2}} \right]^{\frac{2}{3}} [(b + zy_n)y_n] \quad (33)$$

Y simplificando un poco más la expresión se encuentra que:

$$\frac{Qn}{S_o^{\frac{1}{2}}} = \frac{[(b + zy_n)y_n]^{\frac{5}{3}}}{[b + 2y_n\sqrt{1 + z^2}]^{\frac{2}{3}}} \quad (34)$$

Por lo tanto, para hallar el valor del tirante normal en secciones trapezoidales, se procede a resolver la ecuación 34 reemplazando los valores de las incógnitas del problema, de tal manera que la única incógnita sea la del tirante normal ( $y_n$ ). Esta ecuación se puede desarrollar por diversos métodos inclusive el método del tanteo.

#### 4.3.2 Ecuación de la pendiente crítica

A partir de la ecuación 25, se puede encontrar una expresión para la pendiente crítica, esta se hallará cuando las condiciones hidráulicas y geométricas se encuentren en el régimen crítico:



$$S_c = \left( \frac{V_c n}{R_c^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (35)$$

Donde

$S_c$  : Es la pendiente crítica ( $m/m$ )

$V_c$ : Es igual a la velocidad en régimen crítico ( $m/s$ )

$n$ : Es el coeficiente de rugosidad de Manning ( $s/m^{\frac{1}{3}}$ )

$R_c$ : Es el radio hidráulico para condiciones críticas ( $m$ );  $(R_c = A_c/P_c)$ , donde  $A_c$  es el área de la sección y  $P_c$  es el perímetro mojado, ambos en condiciones críticas.

#### 4.4 Curvas de remanso

Se conoce como curvas de remanso o ejes hidráulicos, a los perfiles longitudinales que adquiere la superficie libre del líquido en un canal, cuando se efectúa un escurrimiento bajo las condiciones del flujo gradualmente variado (Villón, 1995). Las curvas de remanso se pueden clasificar según la zona donde se generan y la pendiente del canal.

##### 4.4.1 Clasificación y nomenclatura de las curvas de remanso

A continuación se presenta una tabla resumen de la información presentada en el libro Hidráulica de Canales (Villón, 1995), para la clasificación y nomenclatura de las curvas de remanso:

✓ Se puede clasificar según los tipos de pendiente de fondo ( $S_o$ ):

Nombre	Descripción	Características	Letra
Pendiente Suave	Cuando para las condiciones hidráulicas y geométricas se genera $y_n > y_c$	$y_n > y_c$ $S_o < S_c$	M ( <b>MILD</b> : suave, subcrítica)
Pendiente Crítica	Es aquella pendiente para la cual se satisface que $y_n = y_c$	$y_n = y_c$ $S_o = S_c$	C ( <b>CRITICAL</b> : Crítica)
Pendiente Fuerte	Se produce cuando $y_n < y_c$	$y_n < y_c$ $S_o > S_c$	S ( <b>STEEP</b> : Empinado, abrupto, supercrítico)
Pendiente Horizontal	Es aquella para la cual $S_o = 0$	$S_o = 0$ $v = 0$	H ( <b>HORIZONTAL</b> : Horizontal)

Tabla 2 Zonas de Generación de Curvas de Remanso

El tirante real alude al valor de la altura del flujo que realmente se está presentando en el escurrimiento; la altura del tirante normal y del tirante crítico, son nombradas en esta sección, como valores de referencias entre los cuales se podría encontrar el valor del tirante real.

A continuación, se muestra en la *Tabla 3* y *Tabla 4*, algunas clasificaciones de las curvas de remanso, teniendo en cuenta la zona de generación de estas y la pendiente del fondo del canal:

Pendiente del canal	Relaciones de tirante	$\frac{dy}{dx}$	Prof. en el sent. de la corriente	Curva	Tipo de flujo	Forma del perfil y sentido de cálculo
Suave $0 < S < S_c$	$y > y_n > y_c$	$\frac{+}{-} = +$	Aumenta	$M_1$	Subcrítico	
	$y_n > y > y_c$	$\frac{-}{+} = -$	Disminuye	$M_2$	Subcrítico	
	$y_n > y_c > y$	$\frac{-}{-} = +$	Aumenta	$M_3$	Supercrítico	
Crítica $S_n = S_c$ $y_n = y_c$	$y > y_c = y_n$	$\frac{+}{+} = +$	Aumenta	$C_1$	Subcrítico	
	$y_c = y = y_n$		Constante	$C_2$	Uniforme crítico	
	$y_c = y_n > y$	$\frac{-}{-} = +$	Aumenta	$C_3$	Supercrítico	

Tabla 3 Clasificación para las Curvas de Remanso (Villón, 1995)

Fuerte $S > S_c > 0$	$y > y_c > y_n$	$\frac{+}{+} = +$	Aumenta	$S_1$	Subcrítico	
	$y_c > y > y_n$	$\frac{+}{-} = -$	Disminuye	$S_2$	Supercrítico	
	$y_c > y_n > y$	$\frac{-}{-} = +$	Aumenta	$S_3$	Supercrítico	
Horizontal $S = 0$ $y_n = \infty$	$y > y_c$	$\frac{-}{+} = -$	Disminuye	$H_2$	Subcrítico	
	$y_c > y$	$\frac{-}{-} = +$	Aumenta	$H_3$	Supercrítico	
Adversa $S < 0$ $y_n$ no existe	$y < y_c$	$\frac{-}{+} = -$	Disminuye	$A_2$	Subcrítico	
	$y_c < y$	$\frac{-}{-} = +$	Aumenta	$A_3$	Supercrítico	

Tabla 4 Clasificación para las Curvas de Remanso (Villón, 1995)

## 5. Implementación de la simulación

### 5.1 Descripción del problema: Adaptado de (Villón, 1995).

Un canal trapezoidal tiene un ancho de solera  $b = 1$ , talud  $Z = 1$  y una pendiente de  $0.0005$ . En régimen de flujo uniforme, con un coeficiente de rugosidad  $n = 0.015$ , conduce un caudal de  $800 \text{ L/s}$ . Sin embargo, aguas abajo es necesario aumentar la pendiente del canal a  $0.2$  (ver *Figura 4*). La altura de la sección transversal es de  $1 \text{ [m]}$ . A continuación, una figura ilustrativa del problema:

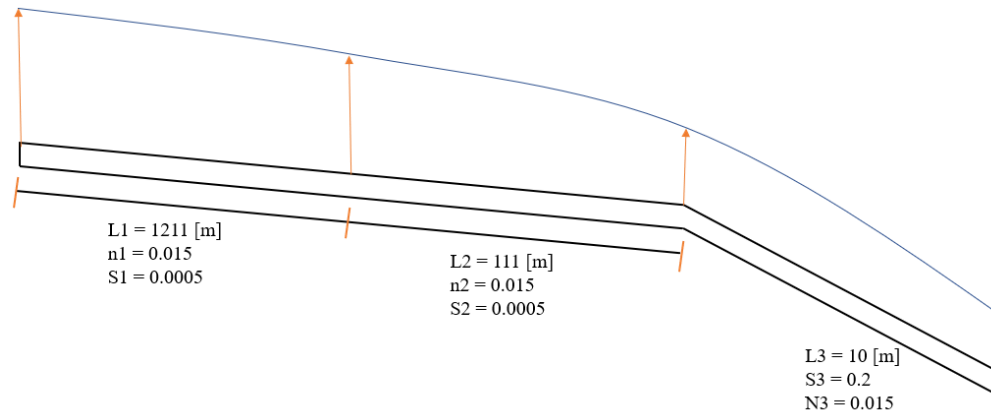


Figura 4 Perfil longitudinal

La sección transversal a lo largo de todo el canal se muestra en la *Figura 5*.

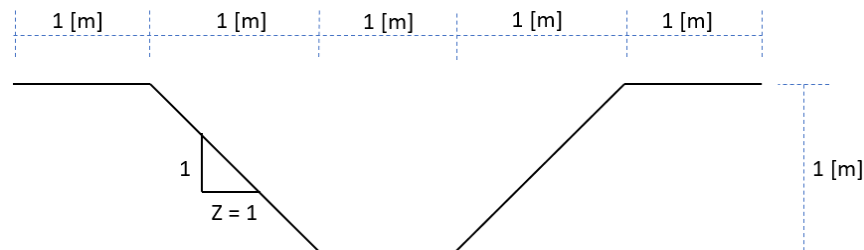


Figura 5 Sección transversal

### 5.2 Procedimiento de implementación

Este se llevará a cabo en HEC-RAS, v5.0.7 (HEC-RAS, 2008), donde se deberán ingresar datos como la geometría del canal, valores de flujo (entre ellos condiciones de contorno) y un plan de ejecución que el programa utilizará para realizar la simulación.

#### 5.2.1 Abrir del 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, haga clic en *File* y luego en *New Project* (*Figura 6*)

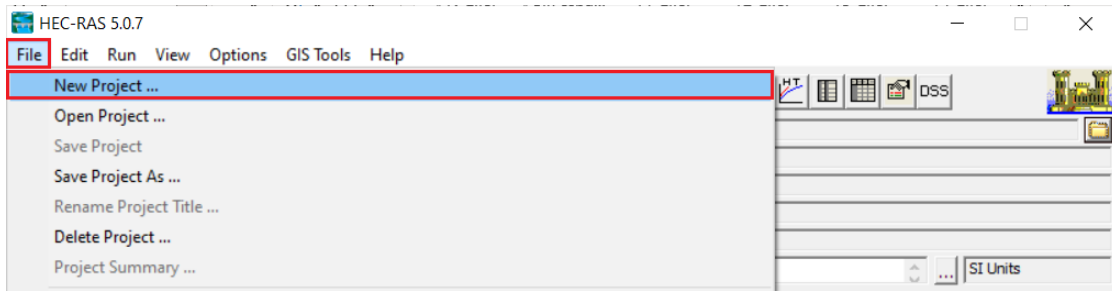


Figura 6 Ventana para la creación de un nuevo proyecto

- ✓ Haga clic en el botón *Default Project Folder*, y luego en *Create Folder* (Figura 7)

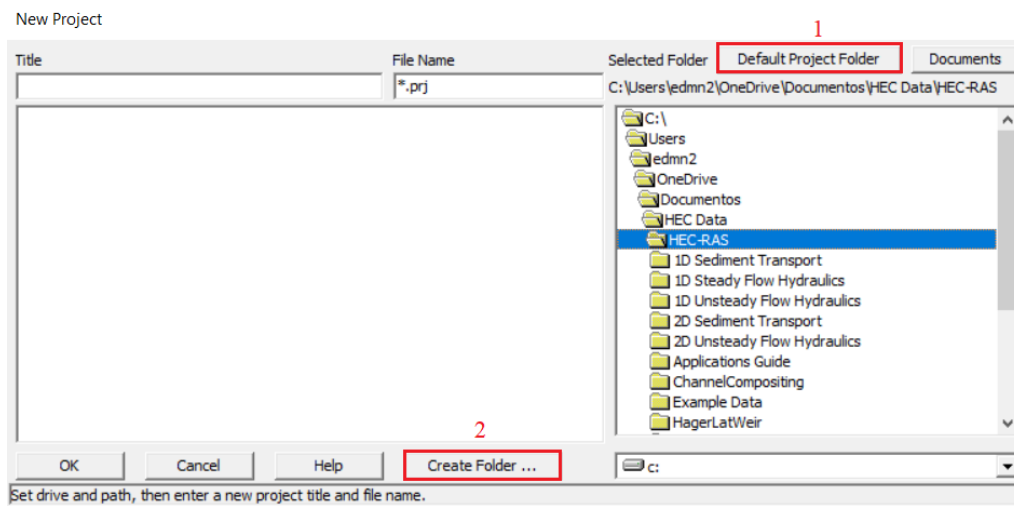


Figura 7 Ventana de creación de un nuevo proyecto

- ✓ En la ventana emergente coloque el nombre de la carpeta *Simulación 6* y haga clic en *OK*

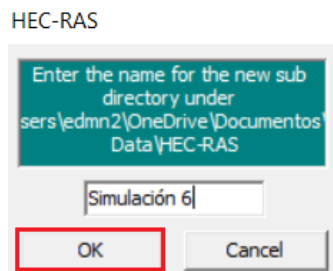


Figura 8 Ventana para nombrar la nueva carpeta

- ✓ La nueva carpeta se muestra en la ruta seleccionada

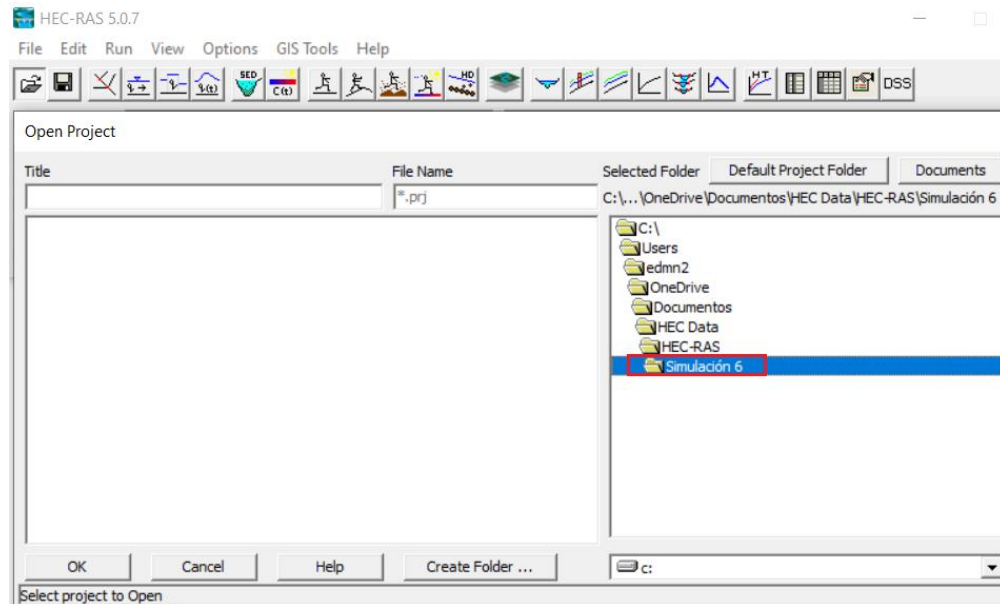


Figura 9 Ventana del proyecto con una nueva carpeta asignada

- ✓ Ingrese el nombre del proyecto “*Práctica\_6*” en el campo Title. Acepte la asignación del nombre presionando la tecla “OK” (Figura 10)

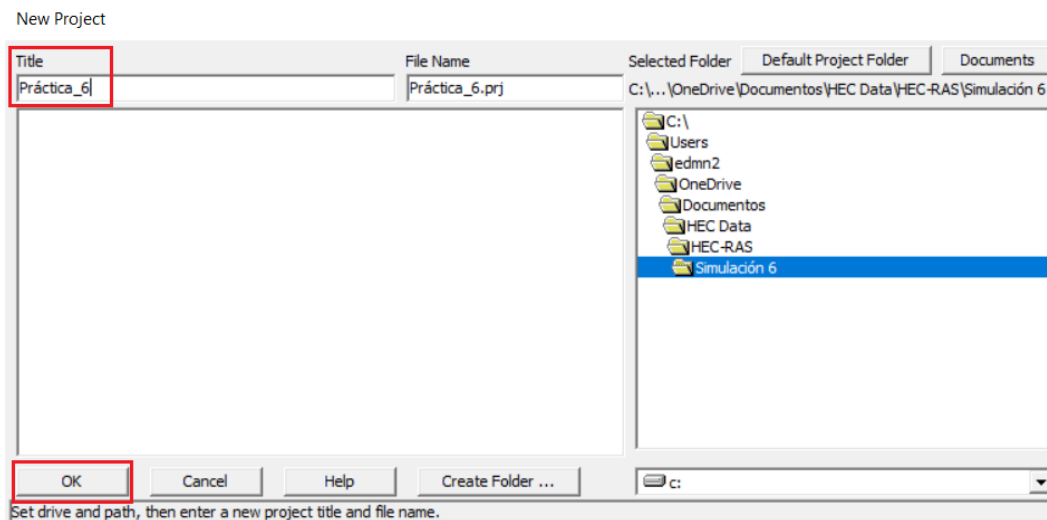


Figura 10 Ventana del nombre y guardado del proyecto

- ✓ La ventana emergente (Figura 11) busca confirmar la creación del proyecto en la ruta seleccionada. Si está de acuerdo, seleccione “Aceptar”

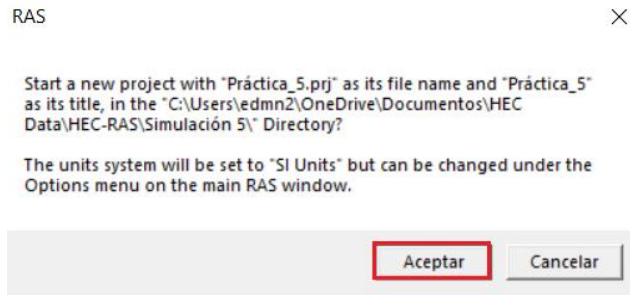


Figura 11 Ventana de carpeta final de destino y sistema de unidades establecido para este proyecto

- ✓ Verifique que el sistema de unidades con el que está trabajando el programa sea el internacional

### 5.2.3 Datos Geométricos

#### Primera sección transversal

- ✓ Haga clic en el icono de *Geometry Data* que se muestra en la *Figura 12*



Figura 12 Icono de datos geométricos

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana (*Figura 13*)

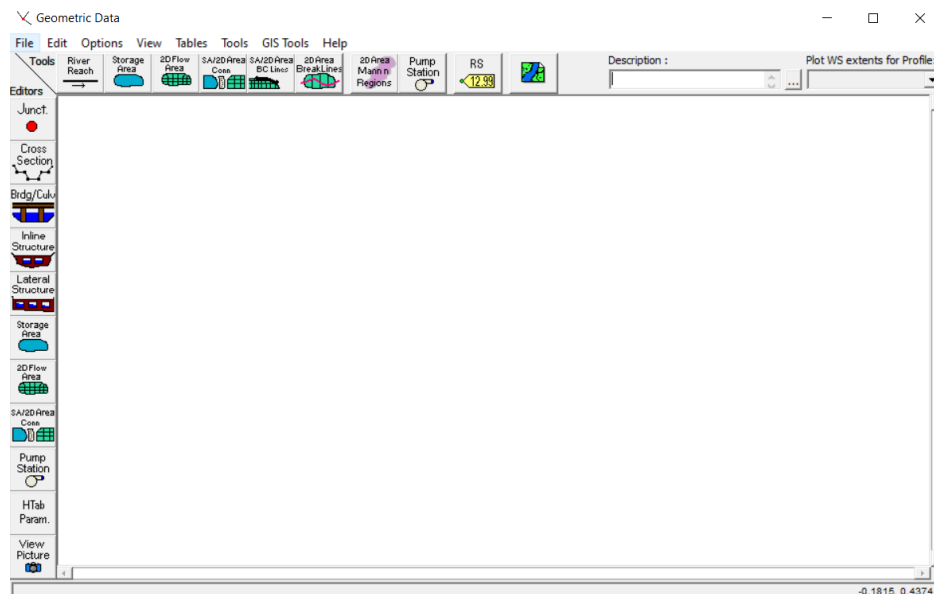


Figura 13 Ventana de Geometric Data

- ✓ Haga clic en el icono de *River Reach* (*Figura 14*) y el puntero del ratón se convertirá en un lápiz de tal manera que permitirá dibujar en la ventana de datos geométricos



Figura 14 Icono de river reach



- ✓ Seguido a esto haga 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

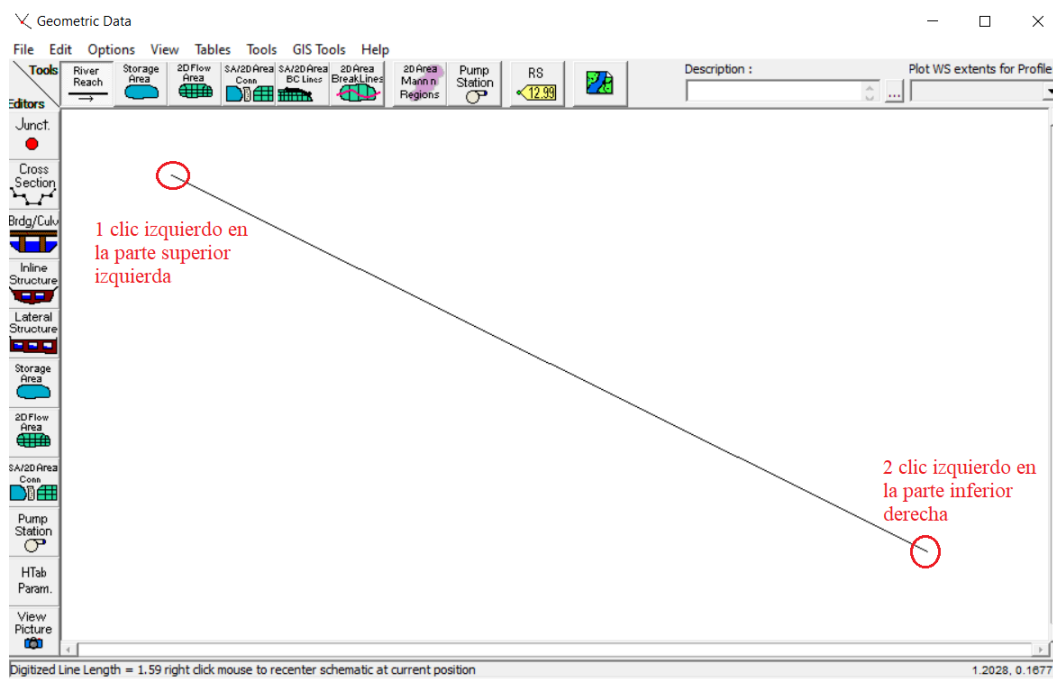


Figura 15 Ventana para el dibujo del tramo del río

- ✓ 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*

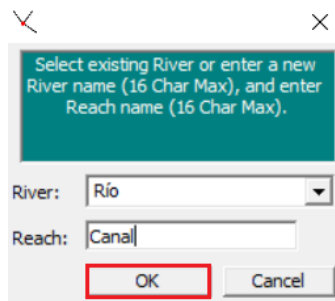


Figura 16 Ventana para nombrar el río y el canal

- ✓ Obtendrá el siguiente resultado



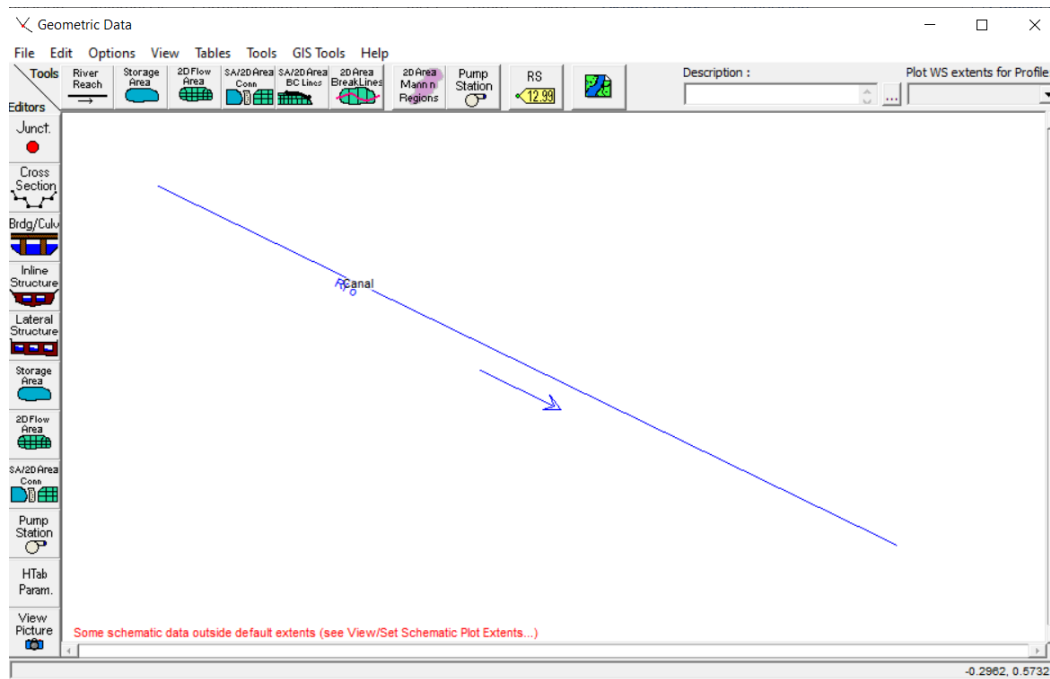


Figura 17 Ventana de creación del río en los datos geométricos

- ✓ Luego de esto ubique la opción *Cross Section* y haga clic sobre esta



Figura 18 Icono de sección transversal

- ✓ En la nueva ventana, haga clic en *Options>Add a new Cross Section (Figura 19)*

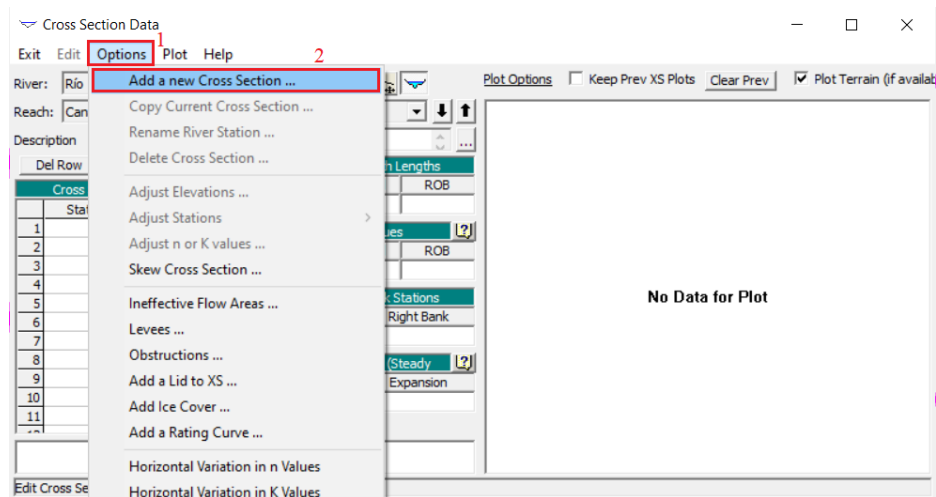


Figura 19 Ventana para añadir una nueva sección transversal

- ✓ A continuación, ingrese el número 1 que hace referencia a la primera sección transversal (Figura 20)

HEC-RAS

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

1

OK Cancel

Figura 20 Ventana para la primera sección transversal

- ✓ La ventana emergente se cerrará. En la nueva ventana, proceda a diligenciar las celdas con la información que se muestra a continuación:

Description Sección 1

Figura 21 Ventana de la descripción para la sección 1

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
0	0	0

Figura 22 Ventana de valores de distancia hasta la sección inmediata aguas abajo

Cross Section Coordinates		
	Station	Elevation
1	-2.5	101
2	-1.5	101
3	-0.5	100
4	0.5	100
5	1.5	101
6	2.5	101

Figura 23 Ventana con los datos de la sección transversal

Manning's n Values		
LOB	Channel	ROB
0.015	0.015	0.015

Figura 24 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 25)

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
-1.5	1.5

Figura 25 Ventana para establecer el canal principal

- ✓ En la sección final se encontrarán los valores de contracción y expansión que se dejarán por defecto (Figura 26)

Cont\Exp Coefficient (Steady)	
Contraction	Expansion
0.1	0.3

Figura 26 Ventana de los coeficientes de contracción y expansión

Para este caso, los coeficientes de contracción y expansión hacen referencia a las pérdidas en alcantarillas.

- ✓ 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 27)

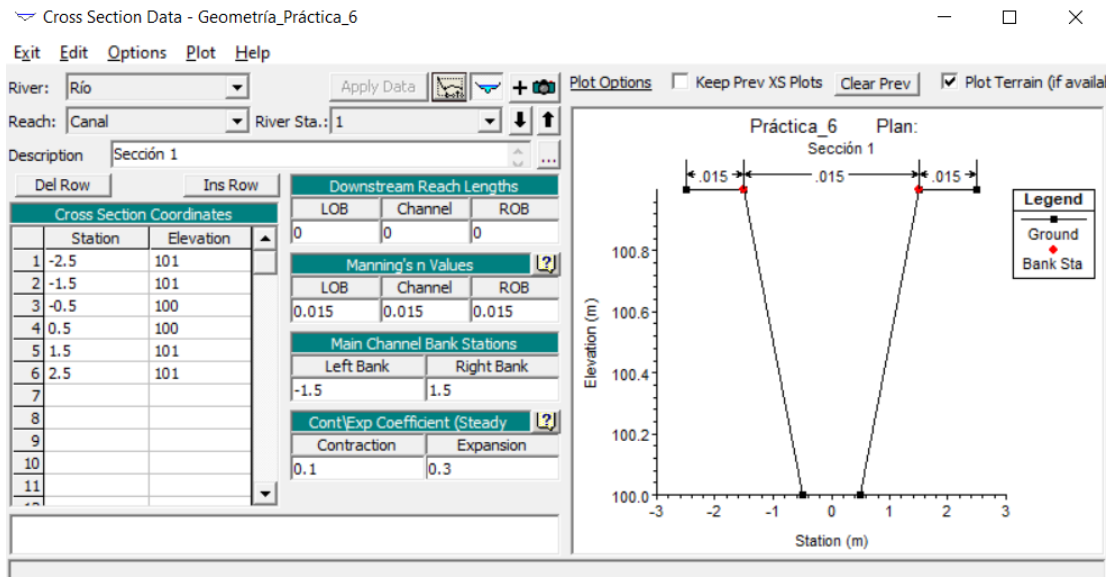


Figura 27 Ventana de la Sección 1

## Segunda sección transversal

- ✓ Para crear la segunda sección transversal, estando en la ventana de la *Figura 27*, proceda a dar clic en *Options* y luego en *Copy Current Cross Section* (*Figura 28*)

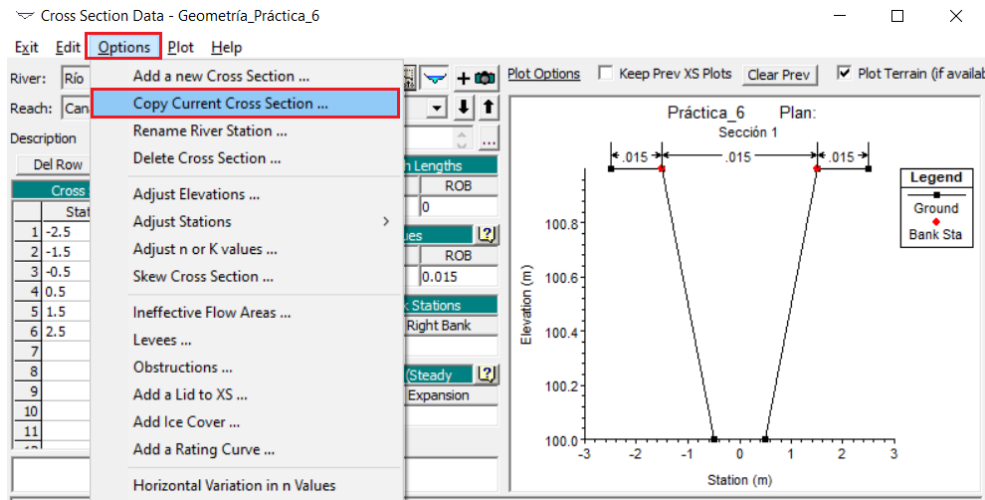


Figura 28 Ventana para copiar la actual sección transversal

- ✓ 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 29*)

Copy Cross Section

Select a River and Reach and then enter a new river station.

River: Río

Reach: Canal

River Sta: 2

OK Cancel

Figura 29 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

Description: Sección 2

Figura 30 Ventana para la descripción de la segunda sección transversal

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
10	10	10

Figura 31 Ventana para definir la distancia hasta la sección aguas abajo

- ✓ Para el caso de la ubicación de la sección transversal se procederá a desarrollar el siguiente procedimiento

Haga clic en *Options* y luego en *Adjust Elevations*, lo cual permitirá ajustar los valores de elevación en la sección transversal (Figura 32)

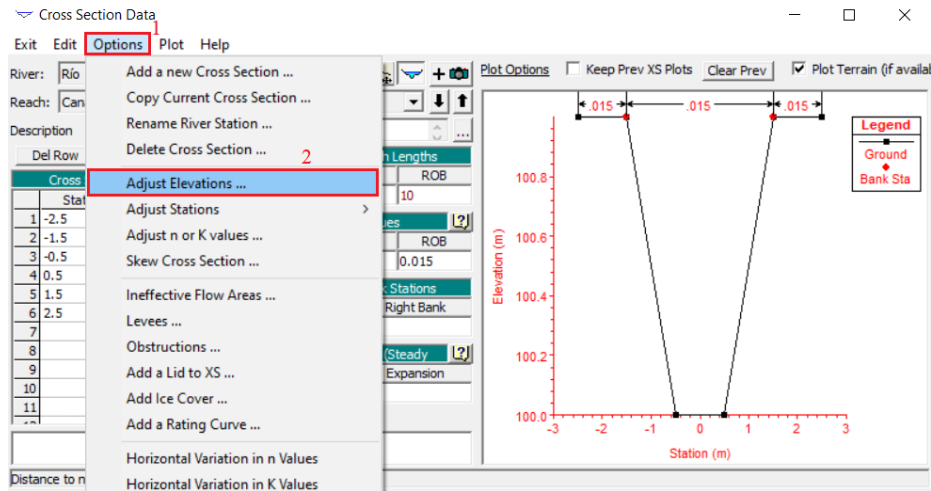


Figura 32 Ventana para el ajuste de las elevaciones para la sección 2

Del desarrollo del problema se sabe que la altura a la cual se encontrará la sección número 2 es igual a  $h = S * L$ ; donde  $S$ , es el valor de la pendiente entre las secciones 1 y 2, y  $L$ , es la distancia horizontal entre las pendientes. Por lo tanto,  $h = 0.2 * 10$ , da como resultado que la sección 2, se encuentra a 2 metros de altura sobre la sección 1.

Por lo tanto, ingresará en la sección de ajustar elevaciones el valor de 2

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la que deberá ingresar el valor de 2 y dar clic en *OK* (Figura 33)

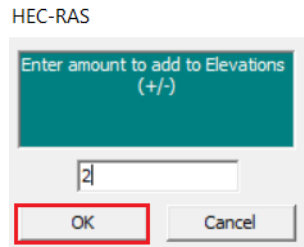


Figura 33 Ventana para el ajuste de la elevación en la sección 2

- ✓ Se encontrará con una ventana como la siguiente, la cual poseerá todos los datos y finalmente dará clic en *Apply Data* (Figura 34)

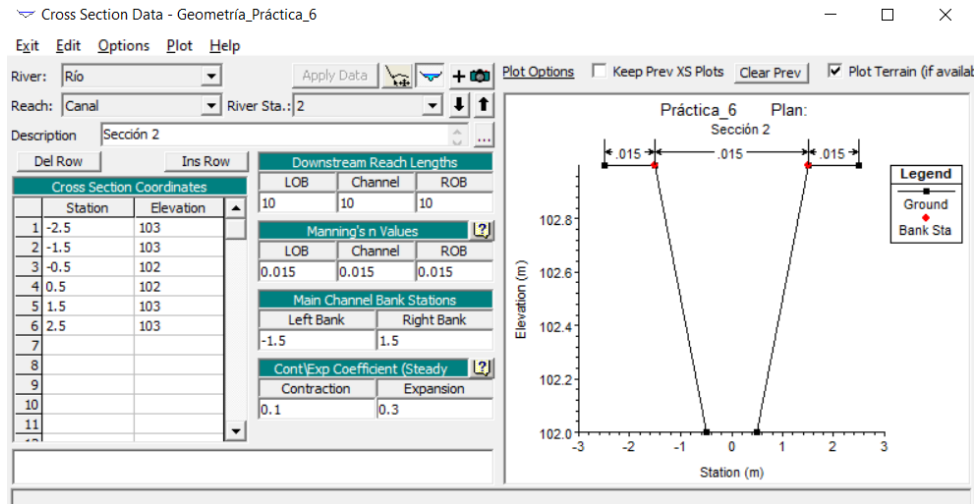


Figura 34 Ventana de la Sección 2

### Tercera sección transversal

- ✓ La sección 3 solo difiere de la sección 2 en los datos de la cota. Lo que permite copiar la sección 2 y solo cambiar el valor de la cota el cual sería  $h = S * L$ , es decir,  $h = 0.0005 * 111$ , lo cual resulta en un valor de 0.0555 [m].
- ✓ Para esta sección proceda a realizar una copia de la sección transversal como se muestra en la Figura 28
- ✓ En el número identificador de la posición relativa coloque 3 (Figura 29)
- ✓ En *Description* ingrese Sección 3 (Figura 30)
- ✓ La distancia entre las secciones 3 y 2 es de 111 (Figura 31)
- ✓ Se ajustan las elevaciones en 0.0555 (Figura 32 y Figura 33)
- ✓ Los cambios respectivos para la sección 3, se ven en la Figura 35

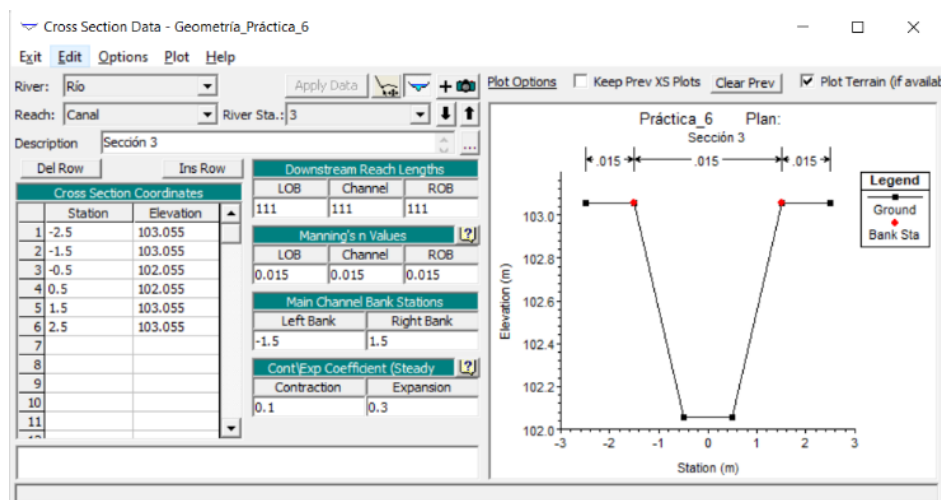


Figura 35 Ventana de la Sección 3

### Cuarta sección transversal

- ✓ La sección 4 solo difiere de la sección 3 en los datos de la cota. Lo que permite copiar la sección 3 y solo cambiar el valor de la cota el cual sería  $h = S * L$ , es decir,  $h = 0.0005 * 1211$ , lo cual resulta en un valor de 0.6055 [m].
- ✓ Para esta sección proceda a realizar una copia de la sección transversal como se muestra en la *Figura 28*
- ✓ En el número identificador de la posición relativa coloque 4 (*Figura 29*)
- ✓ En *Description* ingrese *Sección 4* (*Figura 30*)
- ✓ La distancia entre las secciones 4 y 3 es de 1211 (*Figura 31*)
- ✓ Se ajustan las elevaciones en 0.6055 (*Figura 32* y *Figura 33*)
- ✓ Los cambios respectivos para la sección 4, se ven en la *Figura 36*

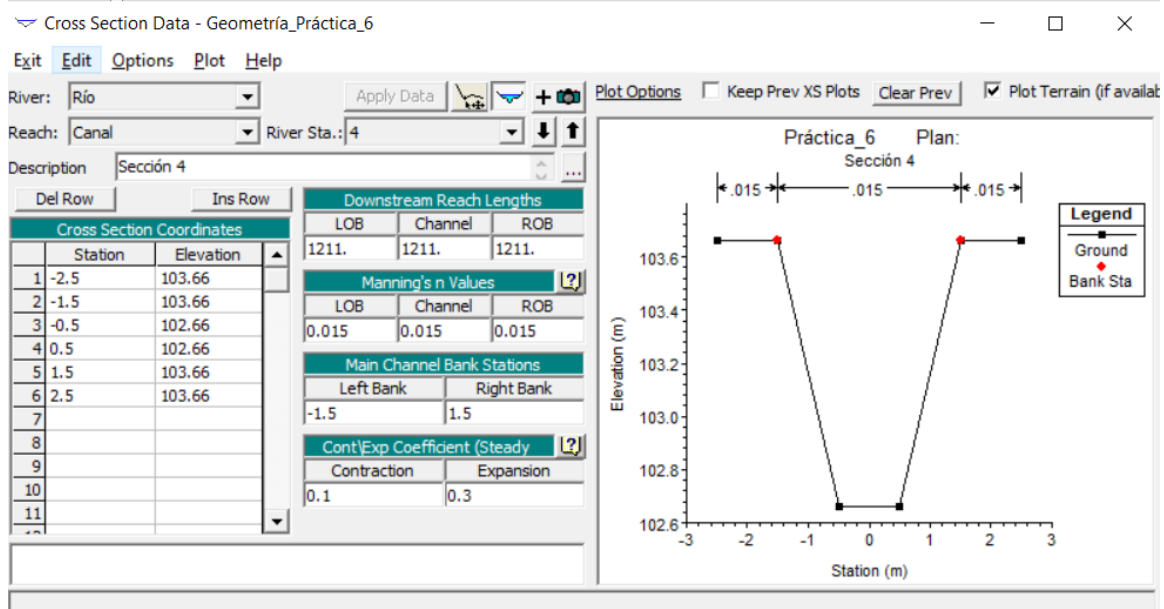


Figura 36 Ventana de la Sección 4

- ✓ Cierre la ventana presente en la *Figura 36*
- ✓ Obtendrá una ventana como se muestra en la *Figura 37*

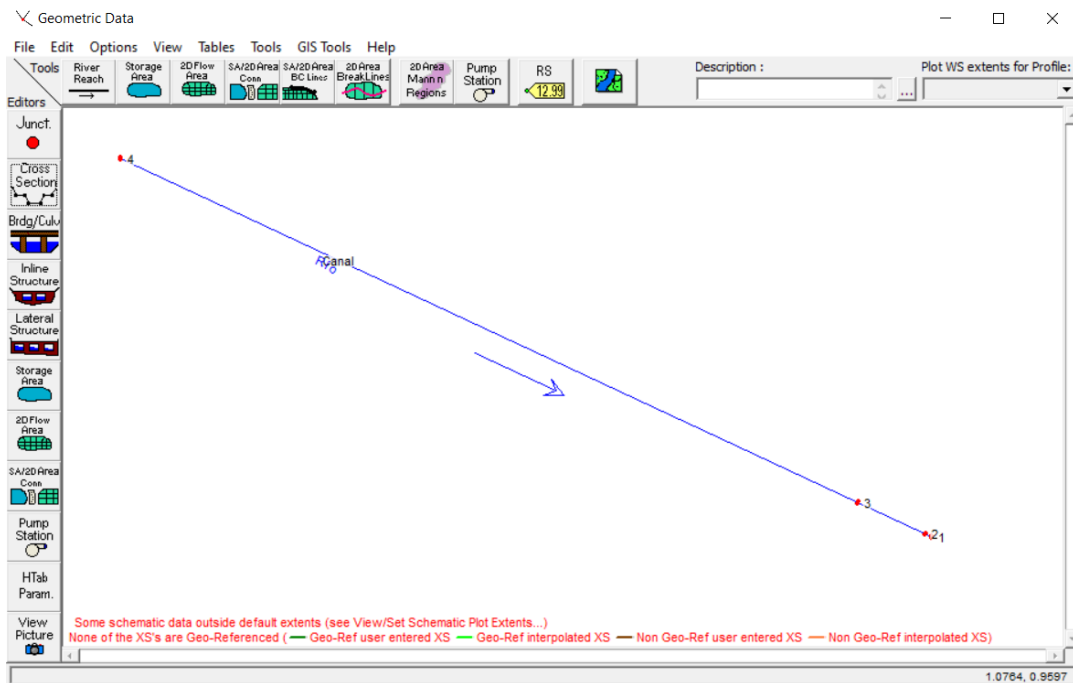


Figura 37 Ventana final de los datos geométricos

- ✓ Para el guardado de los datos geométricos proceda a dar clic en *File* y luego en *Save Geometry Data* (Figura 38)

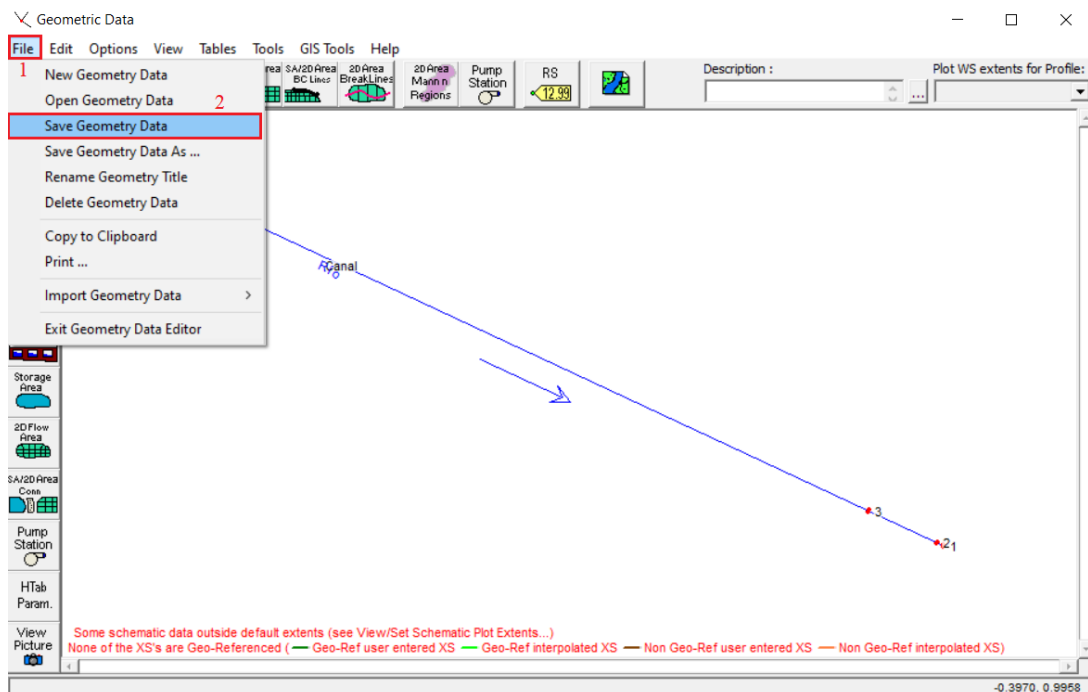


Figura 38 Ventana para el guardado de los datos geométricos



- ✓ Aparecerá la siguiente ventana en la cual deberá ingresar el título de *Geometría\_6* para finalmente dar clic en *Ok* (Figura 39)

Save Geometry Data As

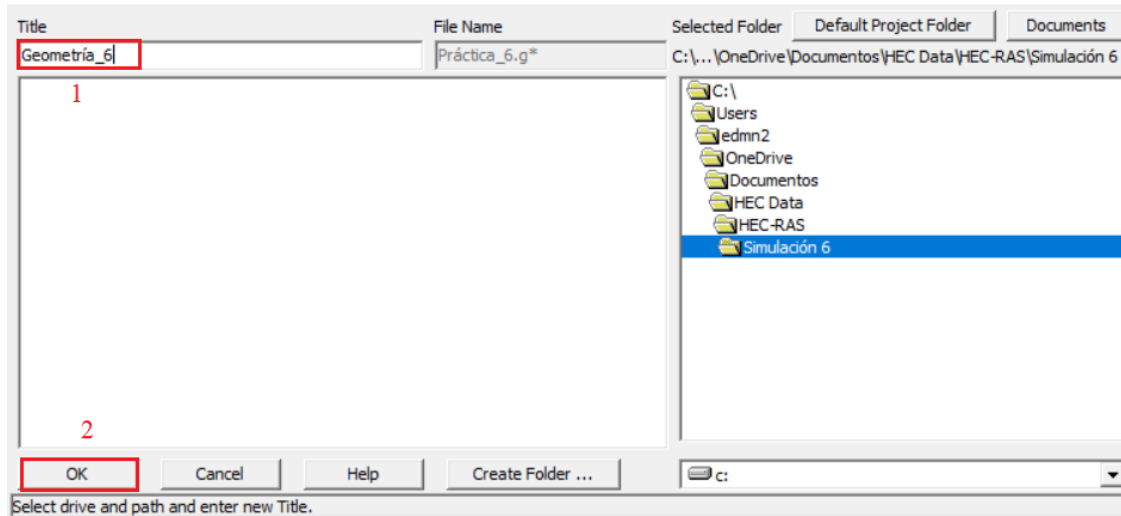


Figura 39 Ventana del guardado de los datos geométricos

- ✓ Al final volverá a la ventana que se muestra en la Figura 37, pero con los datos geométricos guardados (Figura 40)

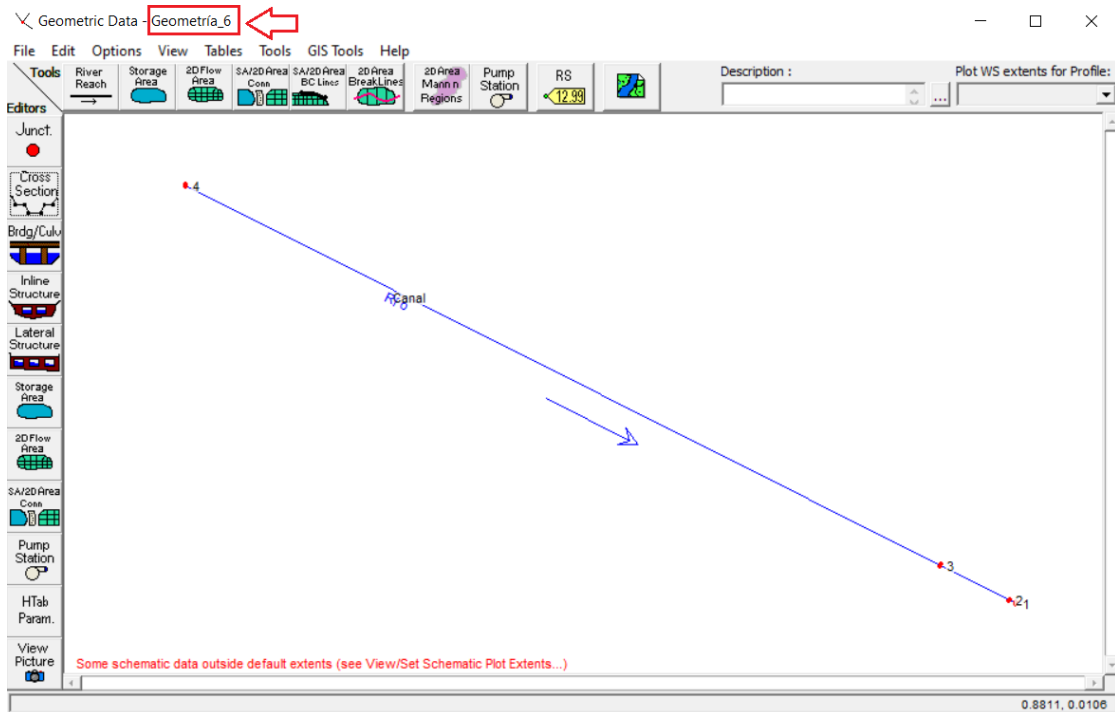


Figura 40 Ventana con los datos geométricos guardados

- ✓ Proceda a cerrar la ventana presentada en la Figura 40 y se le presentará la siguiente ventana del programa HEC-RAS

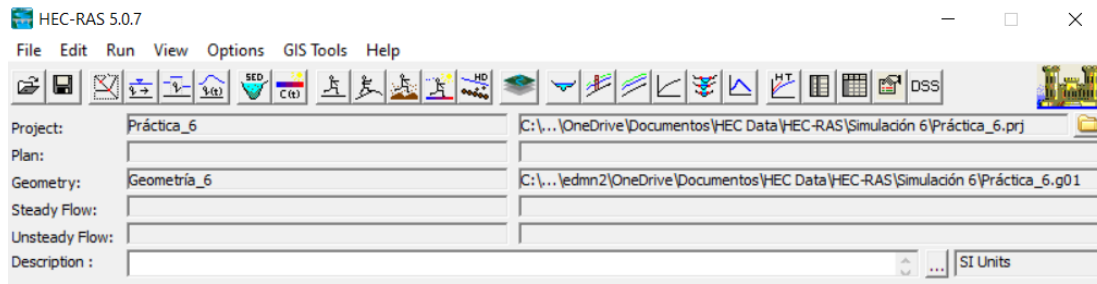


Figura 41 Ventana de HEC-RAS con los datos geométricos guardados

#### 5.2.4 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. 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](http://www.hidrojing.com)

#### Datos del flujo

- ✓ Para ingresar los datos del flujo, haga clic en el icono de *Steady Flow Data*, de la ventana principal de HEC-RAS (Figura 42)

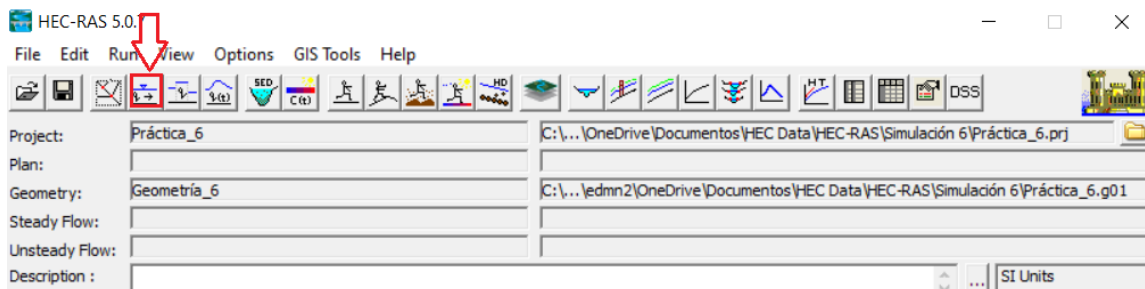


Figura 42 Ventana del programa HEC-RAS y el icono Steady Flow Data

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la cual procederá a ingresar el valor del caudal que es de 0.8 [m<sup>3</sup>/s] en la casilla especificada (Figura 43)

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates
River	Reach	RS	PF 1
1 Río	Canal	4	0.8

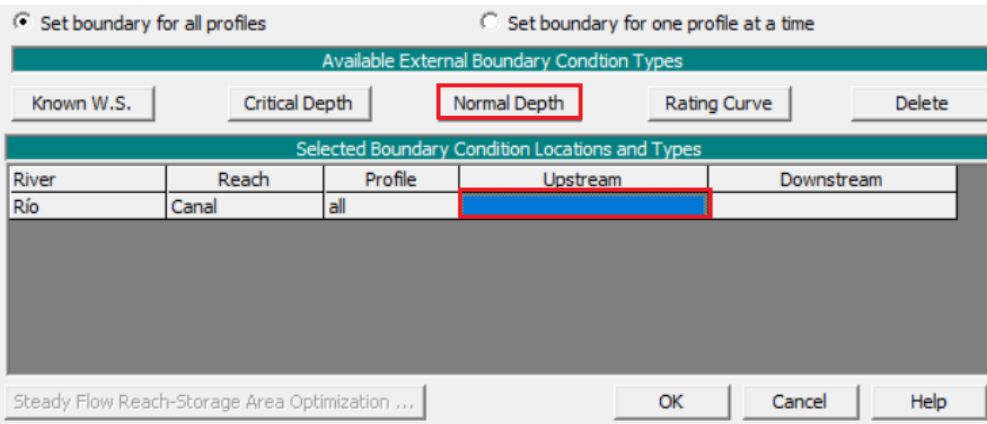
Figura 43 Ventana para el ingreso del valor del caudal

- ✓ Luego haga clic en *Apply Data* > *Reach Boundary Conditions* (Figura 44)

Figura 44 Ventana de aplicación de datos y botón de condiciones de contorno

- ✓ 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 (**5.2.4 Datos del flujo**), se encontrará que cuando se realizan simulaciones en flujo mixto en HEC-RAS, las condiciones de contorno deben establecerse en las secciones aguas arriba y abajo, respectivamente.

En *Reach Boundary Conditions* haga clic en la casilla inmediatamente debajo de *Upstream*, esta casilla se resaltará en azul. Seleccione *Normal Depth* (Figura 45) y en la ventana que aparece ingrese el valor de 0.0005 (Figura 46)



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

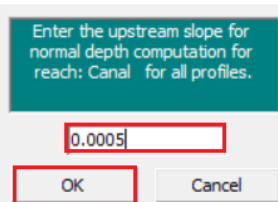
River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
Río	Canal	all	<b></b>	

Steady Flow Reach-Storage Area Optimization ...

OK Cancel Help

Select Boundary condition for the upstream side of selected reach.

Figura 45 Ventana para ingresar las condiciones de contorno aguas arriba



HEC-RAS

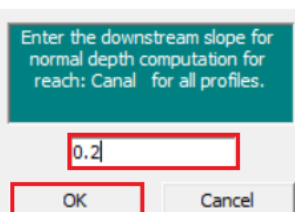
Enter the upstream slope for normal depth computation for reach: Canal for all profiles.

0.0005

OK Cancel

Figura 46 Ventana para ingresar la pendiente aguas arriba

- ✓ Repita el proceso seleccionando la casilla inmediatamente debajo de *Downstream*, seleccione *Normal Depth* e ingrese el valor de 0.2 para luego dar clic en *Ok*; como se muestra en la Figura 47



HEC-RAS

Enter the downstream slope for normal depth computation for reach: Canal for all profiles.

0.2

OK Cancel

Figura 47 Ventana para ingresar la pendiente aguas abajo

- ✓ Volverá a la ventana mostrada en la Figura 48, donde debe hacer clic en *OK*.

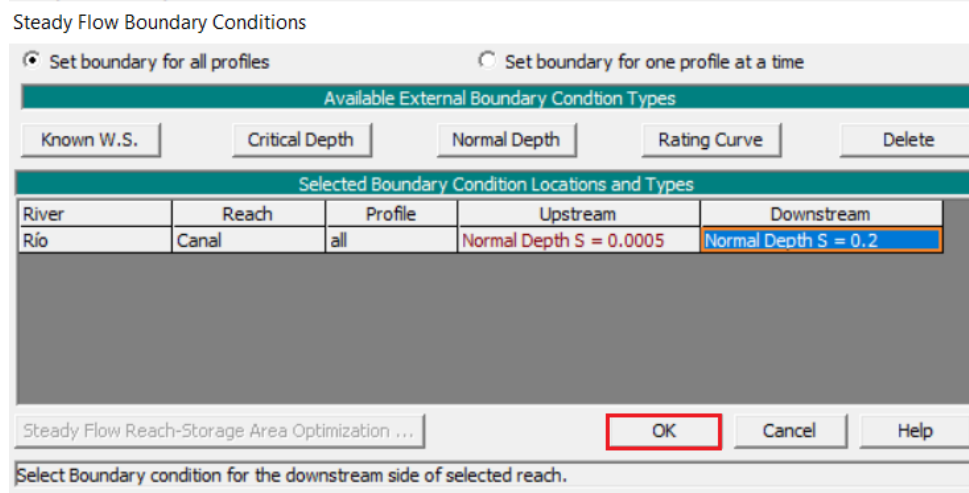


Figura 48 Ventana donde se finalizan las condiciones de contorno

- ✓ Volverá a la ventana mostrada en la *Figura 43*. Es aquí donde dará clic en *File* y luego en *Save Flow Data* (*Figura 49*)

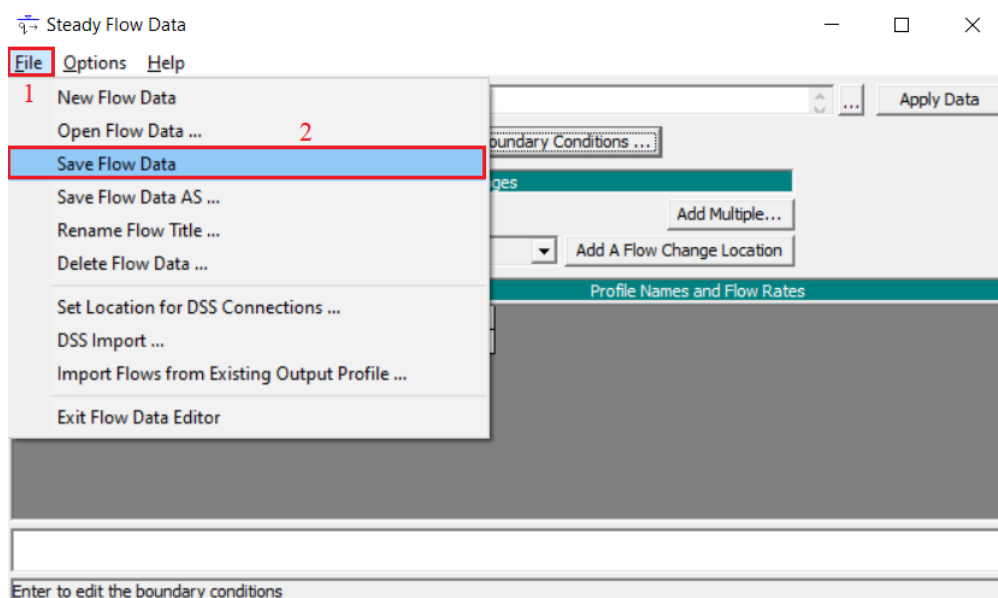


Figura 49 Ventana para el guardado de los datos del flujo

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la cual pondrá como nombre a los datos del flujo *Flow\_6* para luego dar clic en *Ok* (*Figura 50*) y cerrar la ventana *Steady Flow Data – Flow\_6*.

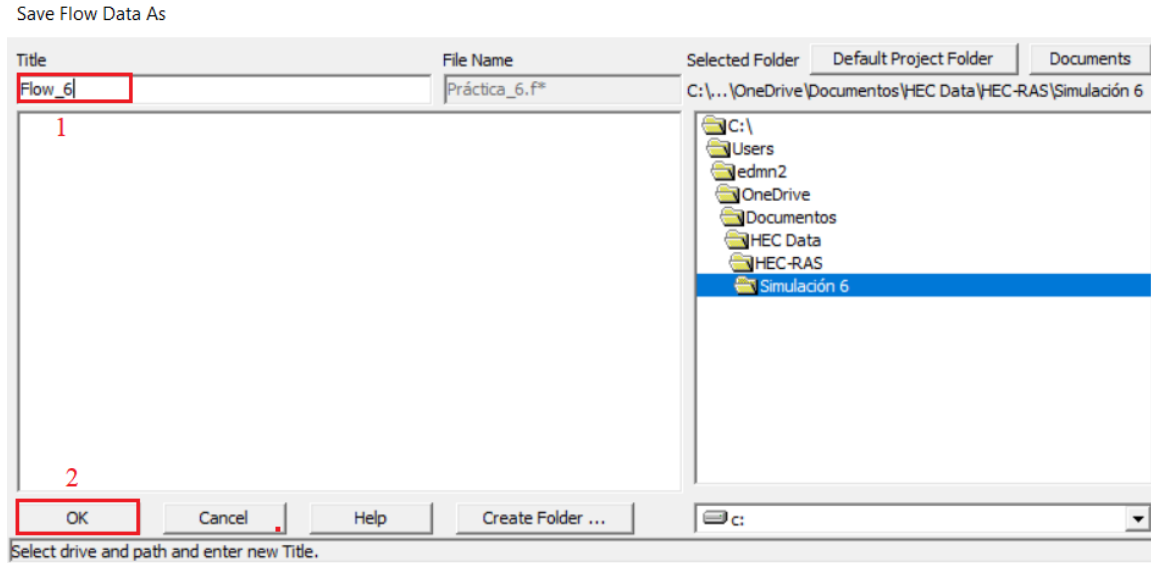


Figura 50 Ventana del guardado final de los datos de flujo

### 5.2.5 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:

- ✓ Haga clic en el icono de *Perform a Steady Flow Simulation* (Figura 51)

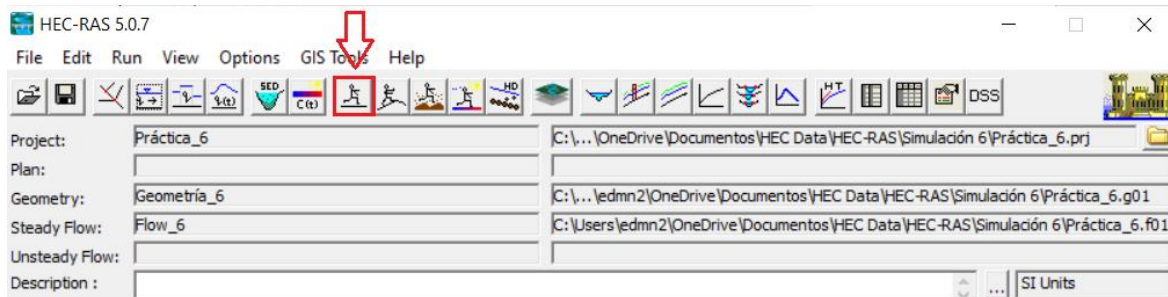


Figura 51 Ventana del programa HEC-RAS y el icono de Perform a Steady Flow Simulation

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la cual se asegurará que el régimen del flujo sea *Mixed* (Figura 52)

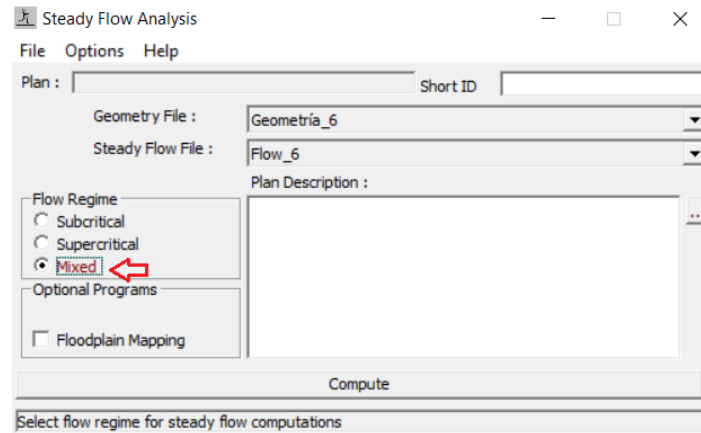


Figura 52 Ventana del análisis del flujo permanente con el régimen mixto

- ✓ Luego haga clic en **File>Save Plan** (Figura 53). Ingrese el nombre del plan “Plan\_6” para luego hacer clic en “Ok” (Figura 54). En la ventana emergente que se muestra, ingrese el valor de “01” y haga clic en “Ok” (Figura 55)

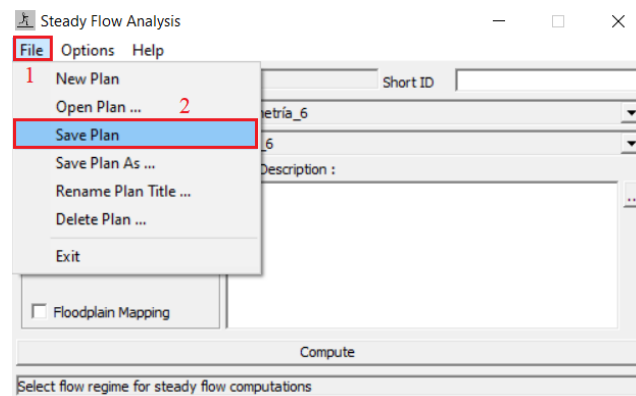


Figura 53 Ventana para el guardado del plan de análisis en flujo permanente

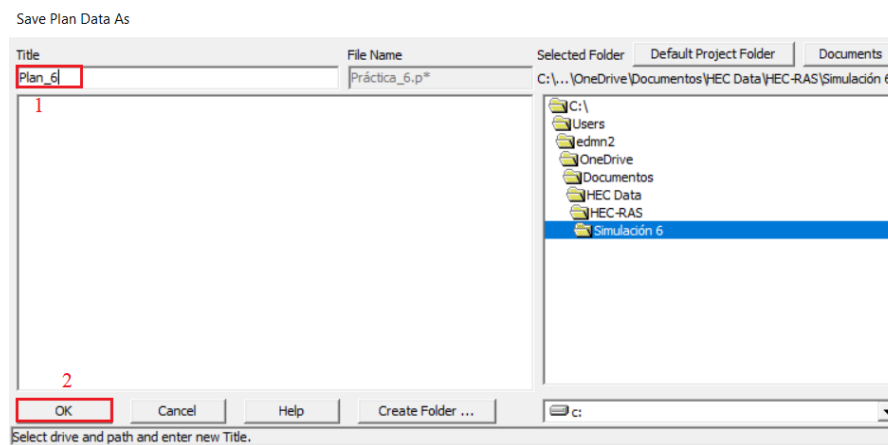


Figura 54 Ventana del guardado del plan de análisis para flujo permanente

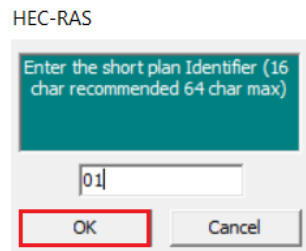


Figura 55 Ventana para el indicativo del plan a realizar

- ✓ Deberá regresar a la ventana mostrada en la *Figura 56*

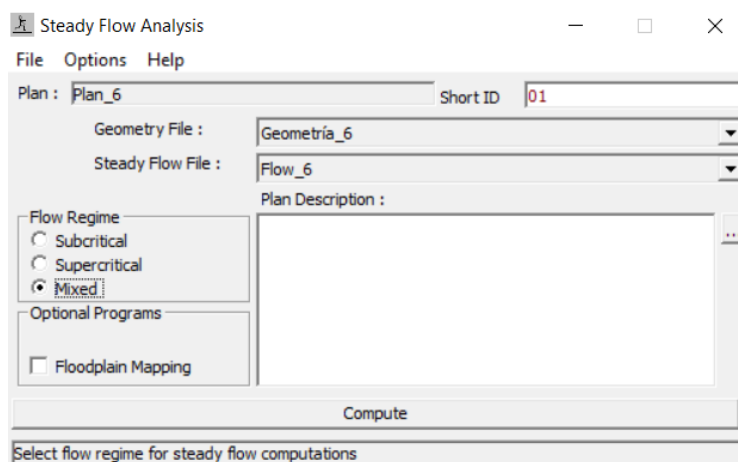


Figura 56 Ventana del plan de análisis para flujo permanente en régimen subcrítico final

Luego de esto haga clic en el icono de computar que se muestra en la *Figura 57*

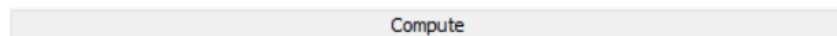


Figura 57 Icono para computar en análisis

Finalmente aparecerá un recuadro donde se evidenciará el avance de la simulación. Al finalizar el proceso haga clic en el icono de *Close* (*Figura 58*)



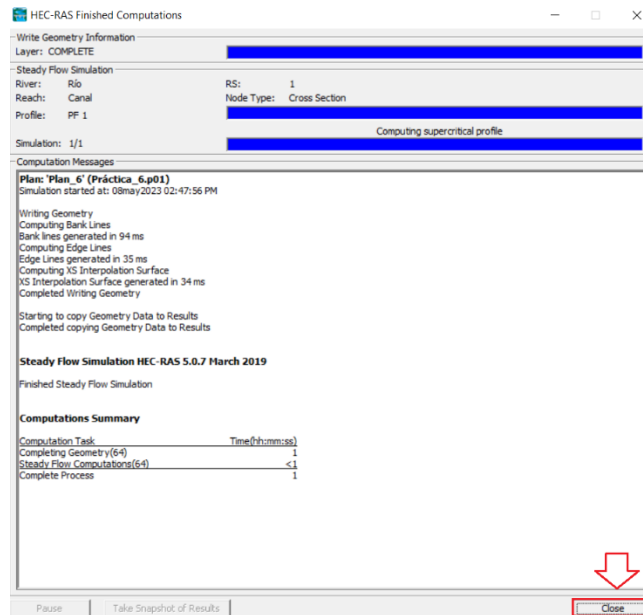


Figura 58 Ventana de computación de la simulación

**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.

### 5.2.6 Presentación de resultados

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

- ✓ Regrese a la ventana inicial de HEC-RAS (Figura 59) y proceda a ubicar las diferentes herramientas que tiene para la visualización de resultados (Figura 60)

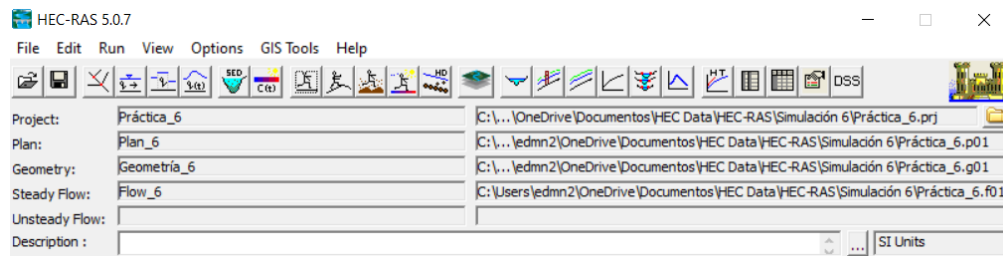


Figura 59 Ventana de HEC-RAS con los datos del plan de simulación añadidos



Figura 60 Iconos de los comandos principales de HEC-RAS

- ✓ Resultados de las secciones transversales (*Figura 61*)



Figura 61 Secciones transversales

- ✓ Resultados del perfil longitudinal (*Figura 62*)



Figura 62 Perfil longitudinal

- ✓ Resultados de la vista 3D del canal (*Figura 63*)



Figura 63 Vista 3D

- ✓ Tabla resumen de los resultados (*Figura 64*)



Figura 64 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.
- ✓ Además de esto, al final del video de la simulación se realiza una breve explicación del proceso de interpolación en las secciones transversales, de tal manera que se obtengan resultados más detallados (**se recalca la importancia de realizar esta interpolación para la solución de las preguntas de análisis**).

#### 5.2.7 Guardado final del proyecto

- ✓ Finalmente, para guardar todo el proyecto y demás componentes de este, haga clic en *File>Save Project* (*Figura 65*)

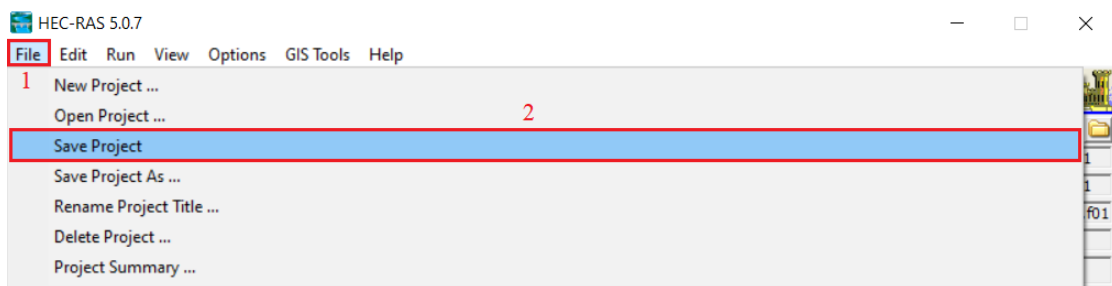


Figura 65 Guardado final del proyecto en HEC-RAS

### 5.3 Video de la simulación

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

- ✓ Enlace del video: <https://www.youtube.com/watch?v=1llkBqWsj3M>

## 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 10*
- ✓ Las secciones transversales finales presentadas en la *Figura 27*, *Figura 34*, *Figura 35* y *Figura 36*
- ✓ El guardado de los datos geométricos como se muestra en la *Figura 39*
- ✓ La ventana que muestra las especificaciones para las condiciones de contorno, presentada en la *Figura 48*
- ✓ El guardado de los datos del flujo presentado en la *Figura 50*
- ✓ El guardado del plan de simulación presentado en la *Figura 54*
- ✓ La ventana que muestra que la simulación se ha corrido con éxito, mostrada en la *Figura 58*
- ✓ Los resultados obtenidos al ver el video de la simulación que se obtienen de la *Figura 61*, *Figura 62*, *Figura 63* y *Figura 64*

### 6.2 Preguntas de análisis

Desarrolle las siguientes preguntas sustentando **las respuestas que lo necesiten**, con los resultados obtenidos del programa.

1. ¿A qué tipo de curva de remanso pertenece la curva obtenida del ejemplo desarrollado en esta guía? Justifique su respuesta con todos los conceptos teóricos necesarios.
2. Escriba un párrafo tipo Abstract sobre el trabajo realizado. Recuerde que un abstract u resumen contiene una oración introductoria, una oración que describe el objetivo del trabajo, sigue con la metodología, los resultados, y finaliza con las conclusiones y recomendaciones a partir del análisis de los resultados.
3. ¿Qué sucedería si se alterara el valor del coeficiente de Manning presente en el canal? Justifique su respuesta utilizando un valor de coeficiente de Manning para todo el canal de 0.025 y contraste los resultados con la simulación inicial; finalmente presente conclusiones del proceso realizado.

## 7. Referencias Bibliográficas

- 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). 6. *Flujo gradualmente variado y perfiles de flujo.* Universidad Nacional de Colombia.  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21725/3353962.2005.Parte%2012.pdf?sequence=17&isAllowed=y>
- Villón, B. (1995). *Hidráulica de canales.* <https://uis-odilotk-es.bibliotecavirtual.uis.edu.co/.https://pdfb9c6919cf9985b759bfeca2ebb3e1fa1.odilo.us/#/e81c25ea3bb04acc86cfe4f557ac2fae/18955710ff93c4e1ea3445e0c6c773fc3fa6b9587e23c2b8572103ae049747ae>