

# MANUAL DE LABORATORIO HIDRÁULICA

---

## PRÁCTICA 6

### FLUJO GRADUALMENTE VARIABLE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL  
DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERIA  
CIVIL



Universidad  
Industrial de  
Santander



# Contenido

<b>Laboratorio 6. Flujo Gradualmente Variado Perfil M2.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Marco Teórico .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Flujo Gradualmente Variado: .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Objetivos: .....</b>	<b>6</b>
<b>3. Procedimiento:.....</b>	<b>6</b>
<b>4. Equipo Utilizado: .....</b>	<b>7</b>
<b>5. Datos.....</b>	<b>7</b>
<b>6. Cálculo Tipo.....</b>	<b>8</b>
<b>7. Resultados .....</b>	<b>11</b>
<b>8. Observaciones y conclusiones .....</b>	<b>12</b>
<b>9. Referencias Bibliográficas: .....</b>	<b>12</b>
Ilustración 1: Vista en sección longitudinal del canal .....	7
Ilustración 2: Perfil del canal .....	11
Ecuación 1 .....	5
Ecuación 2 .....	5
Ecuación 3 .....	5
Ecuación 4 .....	5
Ecuación 5 .....	5
Ecuación 6 .....	5
Ecuación 7 .....	6
Tabla 1:Tabla de resultados .....	11

# Laboratorio 6. Flujo Gradualmente Variado Perfil M2

## 1. Marco Teórico

Los flujos pueden ser clasificados de varias maneras. El sistema generalmente adoptado es el que los clasifica basado en dos parámetros: tiempo y espacio. El grupo al cual pertenece un flujo en particular es de especial importancia para la elección del método de solución más adecuado.

La división de los flujos basada en las variaciones con la distancia y clasifica los flujos como uniforme y variado. Un flujo es uniforme si los parámetros que describen el flujo no varían con la distancia a lo largo del flujo. De la misma manera un flujo no es uniforme si sus parámetros varían de punto en punto a lo largo del flujo. La existencia de flujo uniforme necesariamente implica que el área de la sección transversal perpendicular al flujo es constante.

En muchos casos en canales abiertos las variaciones de los parámetros con respecto a la distancia ocurren de manera gradual dando paso a una subdivisión conocida como flujo gradualmente variado.[1]

### 1.1. Flujo Gradualmente Variado:

El flujo gradualmente variado es un flujo permanente cuya profundidad varía de manera gradual a lo largo de la longitud del canal esta definición establece dos condiciones:

1. El flujo es permanente; es decir las características hidráulicas de flujo permanecen constantes para el intervalo de tiempo bajo consideración
2. Las líneas de corriente se pueden considerar paralelas es decir prevalece la distribución hidrostática de presiones sobre la sección del canal.

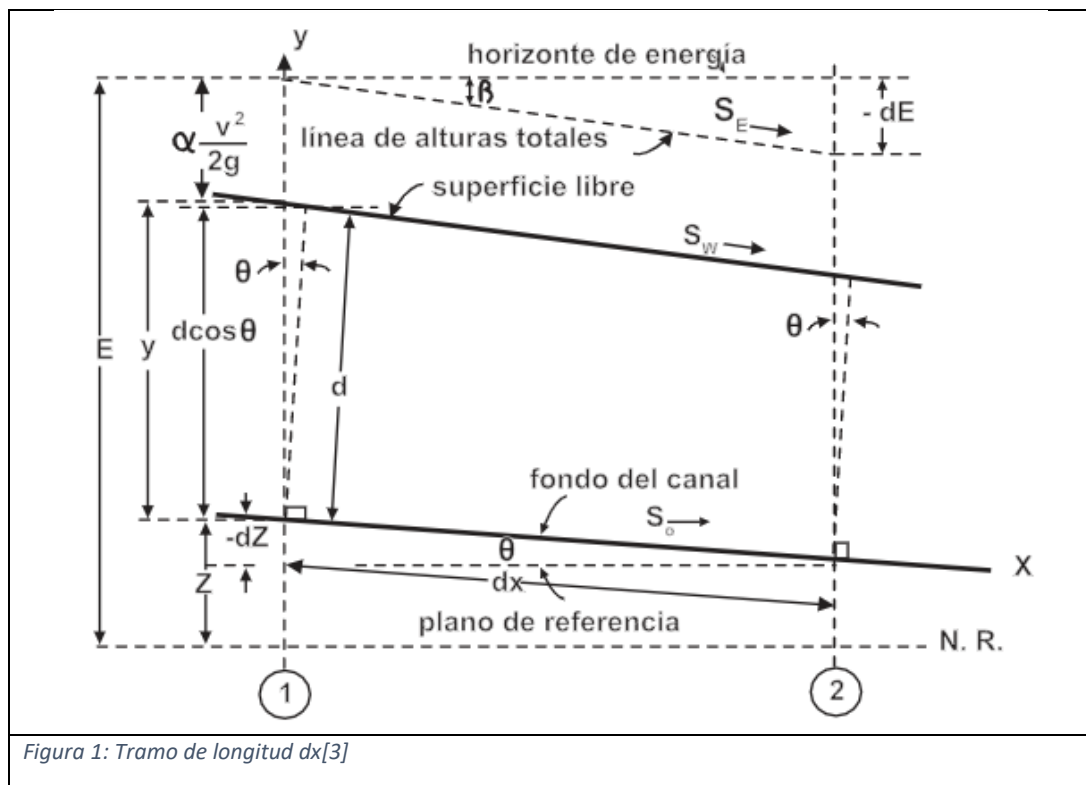
Las teorías desarrolladas giran alrededor de la siguiente suposición básica: **la pérdida de altura entre dos secciones es la misma para un flujo uniforme que tiene la velocidad y el radio hidráulico promedios entre las secciones.**

De acuerdo con esta suposición, la ecuación de flujo uniforme puede utilizarse para evaluar la pérdida de energía de un flujo gradualmente variado entre dos puntos de un canal, y el correspondiente coeficiente de rugosidad desarrollado en principio para flujo uniforme, se aplica al flujo variado. Esta suposición nunca ha sido confirmada de manera precisa por experimentos o por teoría, pero los errores que surgen de ella se cree que son pequeños comparados con aquellos en los cuales se incurre comúnmente durante el uso de una ecuación de flujo uniforme y en la sección del coeficiente de rugosidad. A través de los años esta suposición ha demostrado ser una base confiable para el diseño. La suposición es sin duda, más correcta para flujos variados donde la velocidad aumenta, debido a que en un flujo con velocidad creciente la pérdida de altura es causada

casi en su totalidad por efectos de fricción, mientras que en un flujo con velocidad decreciente pueden existir pérdidas por remolinos de gran escala. Además de la anterior suposición básica, también se utilizan las siguientes suposiciones.

- 1) La pendiente del canal es baja; esto significa que:  
 La profundidad del flujo es la misma sin importar si se utiliza la dirección vertical o normal (al fondo del canal).  
 El factor de corrección de presiones  $\cos \theta^2$  aplicado a la profundidad de la sección de flujo, ecuación  $h = d \cos \theta^2$ , es igual a la unidad.

No ocurre atrapamiento de aire, en caso de que exista un notable atrapamiento de aire, los cálculos deben llevarse a cabo suponiendo que este no existe y después deben corregirse.
- 2) El canal es prismático; es decir, el canal tiene alineamiento y forma constante, por lo tanto, la distribución de la velocidad en la sección del canal es bastante uniforme, luego el coeficiente de distribución de las velocidades es cercano a uno.
- 3) el factor de conducción K es función exponencial de la profundidad de flujo.
- 4) el coeficiente de rugosidad es independiente de la profundidad de flujo y constante a través del tramo del canal bajo consideración.[2]



Bajo las anteriores suposiciones la ecuación de energía total se puede derivar con respecto a x:

$\frac{dH}{dx} = \frac{d}{dx} \left( z + y + \frac{\alpha v^2}{2g} \right)$	<i>Ecuación 1</i>
---	-------------------

Para canales prismáticos  $\alpha = 1$ , se tiene:

$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{d}{dx} \left( z + y + \frac{v^2}{2g} \right) = \frac{dz}{dx} + \frac{dE}{dx} = -S_0 + \frac{dE}{dx}$	<i>Ecuación 2</i>
---	-------------------

La derivada de la línea total de energía total con respecto a x es igual a la pendiente de la línea de energía:

$-S_f = -S_0 + \frac{dE}{dx} = -S_0 + \frac{\Delta E}{\Delta x}$	<i>Ecuación 3</i>
--	-------------------

Remplazando  $\Delta E$  por  $E_1 - E_2$  se tiene:

$\left( y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) = (S_0 - S_f) \Delta x$	<i>Ecuación 4</i>
--	-------------------

o

$E_1 - S_0 \Delta x = E_2 - \bar{S}_f \Delta x$	<i>Ecuación 5</i>
---	-------------------

Función del canal donde existe flujo gradualmente variado el valor de  $S_f$  No es constante y una práctica común es asumir que este valor es el promedio de los  $S_f$  en los extremos de la sección. Para calcular el  $S_f$  en cada extremo de la sección se utiliza la ecuación de Manning (asumiendo un n constante).

Reemplazando estos valores en la ecuación anterior se tiene:

$\left( y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) + \left[ \frac{Q n}{(A R^{2/3})_1} \right]^2 \frac{\Delta x}{2} = S_0 \Delta x + \left( y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left[ \frac{Q n}{(A R^{2/3})_2} \right]^2 \frac{\Delta x}{2}$	<i>Ecuación 6</i>
--	-------------------

Utilizando el principio de conservación de la masa, las velocidades se pueden dar en función de y, el área y radio hidráulico también son funciones de y, por lo tanto, la ecuación anterior tiene como variables  $y_1, y_2$  y  $\Delta x$ . La solución de esta ecuación requiere de la definición de dos de las variables:

$$\Delta x = \frac{\left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(y_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right)}{\frac{1}{2} \left( \left[ \frac{Qn}{(AR^{2/3})_1} \right] + \left[ \frac{Qn}{(AR^{2/3})_2} \right] \right)}$$

*Ecuación 7*

Si se define  $y_1$  e  $y_2$  Y se calcula  $\Delta x$ , se requiere despejar la otra profundidad es necesario utilizar un método interactivo (por ejemplo, Newton Raphson) para encontrar este valor, a este procedimiento de solución se le conoce como el método del paso estándar[2].

## **2. Objetivos:**

- 1) Estudiar la formación de perfiles de canales prismáticos (rectangular)
- 2) Comprobar el perfil M-2 comparando el perfil del laboratorio con el calculado utilizando el método de paso estándar.
- 3) Establecer las posibles fuentes de error.

## **3. Procedimiento:**

- 1) Poner en funcionamiento el sistema de bombeo
- 2) Fijar un caudal próximo a los 30 L/s, una pendiente menor a la crítica para el caudal en el canal.
- 3) Esperar que el flujo en el canal se estabilice.
- 4) Tomar la lectura del caudal en el medidor electromagnético.
- 5) Medir la altura del nivel del agua al final del canal.
- 6) Abscisar el canal cada 40 o 50 cm a partir de la salida (aguas abajo).
- 7) Medir en cada 1 de estos puntos del tirante hasta llegar a la profundidad normal.
- 8) Tomar la altura de elevación del gato hidráulico y la longitud del canal para calcular la pendiente.
- 9) Medir el ancho B del canal.

#### 4. Equipo Utilizado:

Canal rectangular de vidrio.

Metro o regla

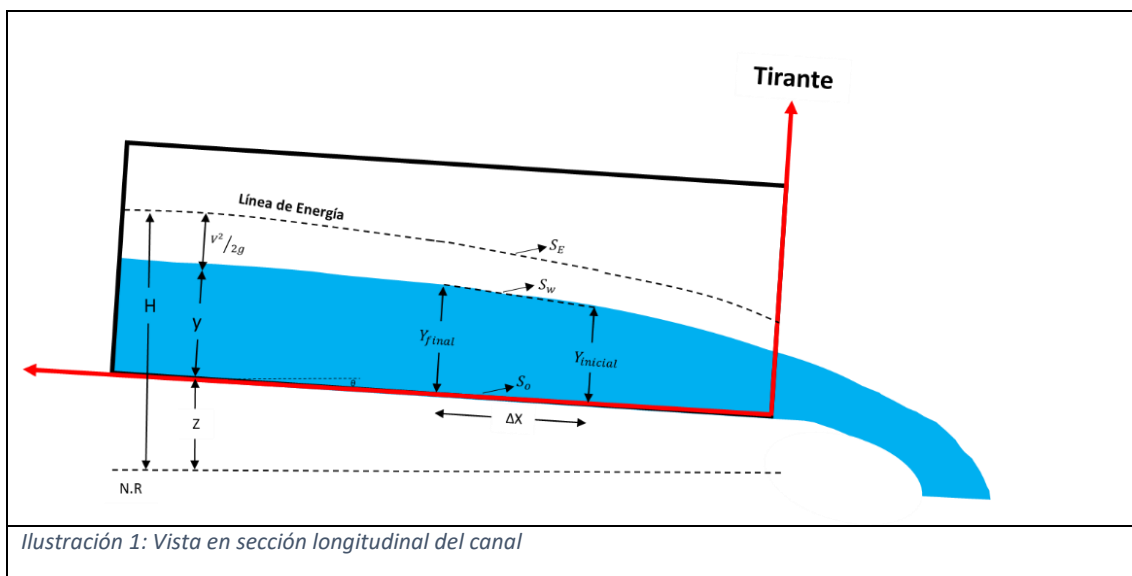
Medidor de flujo electromagnético.

Sistema de Bombeo

#### 5. Datos

Q [L/s]	21,68
	21,87
	21,59

ABS [cm]	Tirante [cm]
0	6,5
40	7,0
80	8,5
120	8,6
160	9,4
200	9,6
240	10,0
280	10,5
320	10,5
360	10,5
400	10,5
440	10,5



## 6. Cálculo Tipo

- ✓ Cálculo de caudal promedio [ $m^3/s$ ]

$$Q_{\text{prom}} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$Q_{\text{prom}} = \frac{(21,68 + 21,87 + 21,59)E^{-3}}{3} = 21,71 \times 10^{-3} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Cálculo de la inclinación del canal

La longitud del canal tiene una medida de 8,3 [m] y el  $\Delta_h = 0,01$  [m].

$$S_o = \frac{\Delta_h}{L}$$

$$S_o = \frac{0,01}{8,3} = 0,0012$$

- ✓ Cálculo de caudal por unidad de base  $\left[ \frac{m^3}{s \cdot m} \right]$

La base del canal tiene una medida de 0,412 [m].

$$q = \frac{Q_{\text{prom}}}{b} \left[ \frac{m^3}{s \cdot m} \right]$$

$$q = \frac{21,71 \times 10^{-3}}{0,412} = 52,702 \times 10^{-3} \left[ \frac{m^3}{s \cdot m} \right]$$

- ✓ Cálculo del tirante hidráulico crítico [m]

Tomamos el valor de la gravedad como 9,81 [m / s<sup>2</sup>].

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} [m]$$

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{(52,702 \times 10^{-3})^2}{9,81}} = 0,066 [m]$$

- ✓ Cálculo del área mojada experimental [m<sup>2</sup>]

La base del canal tiene una medida de 0,412 [m].



$$A_{\text{exp}} = Y_{\text{exp} - 80} * b \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{\text{exp}} = 0,085 * 0,412 = 0,035 \text{ [m}^2\text{]}$$

- ✓ Cálculo del perímetro experimental [m]

La base del canal tiene una medida de 0,412 [m].

$$P_{\text{exp}} = 2 * Y_{\text{exp} - 80} + b \text{ [m]}$$

$$P_{\text{exp}} = 2 * 0,085 + 0,412 = 0,582 \text{ [m]}$$

- ✓ Cálculo del radio hidráulico experimental [m]

$$R_{\text{exp}} = \frac{A_{\text{exp}}}{P_{\text{exp}}} \text{ [m]}$$

$$R_{\text{exp}} = \frac{0,035}{0,582} = 0,060 \text{ [m]}$$

- ✓ Cálculo de la pendiente experimental del canal

El coeficiente de Manning es de 0,011 y la base del canal es de 0,412 [m].

$$S_{\text{exp}} = \left( \frac{Q_{\text{prom}} * n_{\text{teó}}}{A_{\text{exp}} * R_{\text{exp}}^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \text{ [%]}$$

$$S_{\text{exp}} = \left( \frac{(21,71 * 10^{-3}) * 0,011}{0,035 * (0,060)^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = 0,00197$$

- ✓ Cálculo de energía específica experimental [m]

Tomamos el valor de la gravedad como 9,81 [m / s<sup>2</sup>]

$$E_{\text{exp}} = Y_{\text{exp}} + \frac{q^2}{2 * g * Y_{\text{exp} - 80}^2} \text{ [m]}$$

$$E_{\text{exp}} = 0,085 + \frac{(52,702 * 10^{-3})^2}{2 * 9,81 * (0,085)^2} = 0,1046 \text{ [m]}$$

$$E_{\text{exp}} + S_o * \Delta_x = E_{\text{teó}} + S_e * \Delta_x$$

El método estándar dice que la pendiente teórica ( $S_e$ ) es el promedio de la pendiente teórica de la abscisa en estudio (80) y la abscisa anterior (40).

- ✓ Cálculo del tirante hidráulico teórico [m]

El  $\Delta_x$  es de 40 [cm]

Pendiente teórica para la abscisa en estudio:

$$S_{e-80} = \left( \frac{(21,71 \times 10^{-3}) * 0,011}{(Y_{teó-80} * 0,412) * \left( \frac{Y_{teó-80} * 0,412}{2 * Y_{teó-80} + 0,412} \right)^{\frac{2}{3}}} \right)^2$$

Pendiente teórica para la abscisa anterior:

$$S_{e-40} = \left( \frac{(21,71 \times 10^{-3}) * 0,011}{(Y_{teó-40} * 0,412) * \left( \frac{Y_{teó-40} * 0,412}{2 * Y_{teó-40} + 0,412} \right)^{\frac{2}{3}}} \right)^2$$

Se reemplazan las dos ecuaciones anteriores:

$$0,1046 + 0,0012 * 0,4 = \left[ Y_{teó-80} + \frac{(52,702 \times 10^{-3})^2}{2 * 9,81 * (Y_{teó-80})^2} \right] + \left[ S_{e-80} + S_{e-40} / 2 \right] * 0,4$$

Finalmente, se halla el valor del tirante teórico para la abscisa 80

$$Y_{teó-80} = 0,0847 [m]$$

- ✓ Cálculo del error en el tirante para la abscisa 80 [%]

$$\% EY_{80} = \frac{|Y_{teó-80} - Y_{exp-80}|}{Y_{teó-80}} * 100 [\%]$$

$$\% EY_2 = \frac{|0,0847 - 0,085|}{0,0847} * 100 = 0,30 [\%]$$

## 7. Resultados

Abs [cm]	$Y_{exp}$ [m]	$Y_{teo}$ [m]	E [%]	$A_{teo}$ [m <sup>2</sup> ]	$P_{teo}$ [m]	$R_{teo}$ [m]	$SE_{teo}$	$E_{teo}$ [m]	$E_{exp}$ [m]	$A_{exp}$ [m <sup>2</sup> ]	$P_{exp}$ [m]	$R_{exp}$ [m]	$SE_{exp}$	$E_{exp} + S_o \cdot \Delta x$	$E_{teo} + S_{e(prom)} \cdot \Delta x$
0	0,065	0,0650	0,00%	0,0268	0,5420	0,0494	0,0044	0,0985	0,0985	0,0268	0,5420	0,0494	0,0044	-	-
40	0,070	0,0686	2,08%	0,0283	0,5491	0,0514	0,0037	0,0987	0,0989	0,0288	0,5520	0,0522	0,0035	0,0994	0,1003
80	0,085	0,0847	0,30%	0,0349	0,5815	0,0600	0,0020	0,1045	0,1046	0,0350	0,5820	0,0602	0,0020	0,1051	0,1056
120	0,086	0,0863	0,32%	0,0355	0,5846	0,0608	0,0019	0,1053	0,1051	0,0354	0,5840	0,0607	0,0019	0,1056	0,1061
160	0,094	0,0940	0,01%	0,0387	0,6000	0,0645	0,0015	0,1100	0,1100	0,0387	0,6000	0,0645	0,0015	0,1105	0,1107
200	0,096	0,0961	0,10%	0,0396	0,6042	0,0655	0,0014	0,1114	0,1114	0,0396	0,6040	0,0655	0,0014	0,1118	0,1120
240	0,100	0,1001	0,09%	0,0412	0,6122	0,0674	0,0012	0,1142	0,1142	0,0412	0,6120	0,0673	0,0012	0,1146	0,1147
280	0,105	0,1051	0,10%	0,0433	0,6222	0,0696	0,0011	0,1179	0,1178	0,0433	0,6220	0,0695	0,0011	0,1183	0,1184
320	0,105	0,1052	0,15%	0,0433	0,6223	0,0696	0,0011	0,1180	0,1178	0,0433	0,6220	0,0695	0,0011	0,1183	0,1184
360	0,105	0,1052	0,15%	0,0433	0,6223	0,0696	0,0011	0,1180	0,1178	0,0433	0,6220	0,0695	0,0011	0,1183	0,1184
400	0,105	0,1052	0,15%	0,0433	0,6223	0,0696	0,0011	0,1180	0,1178	0,0433	0,6220	0,0695	0,0011	0,1183	0,1184
440	0,105	0,1052	0,15%	0,0433	0,6223	0,0696	0,0011	0,1180	0,1178	0,0433	0,6220	0,0695	0,0011	0,1183	0,1184

Tabla 1: Tabla de resultados

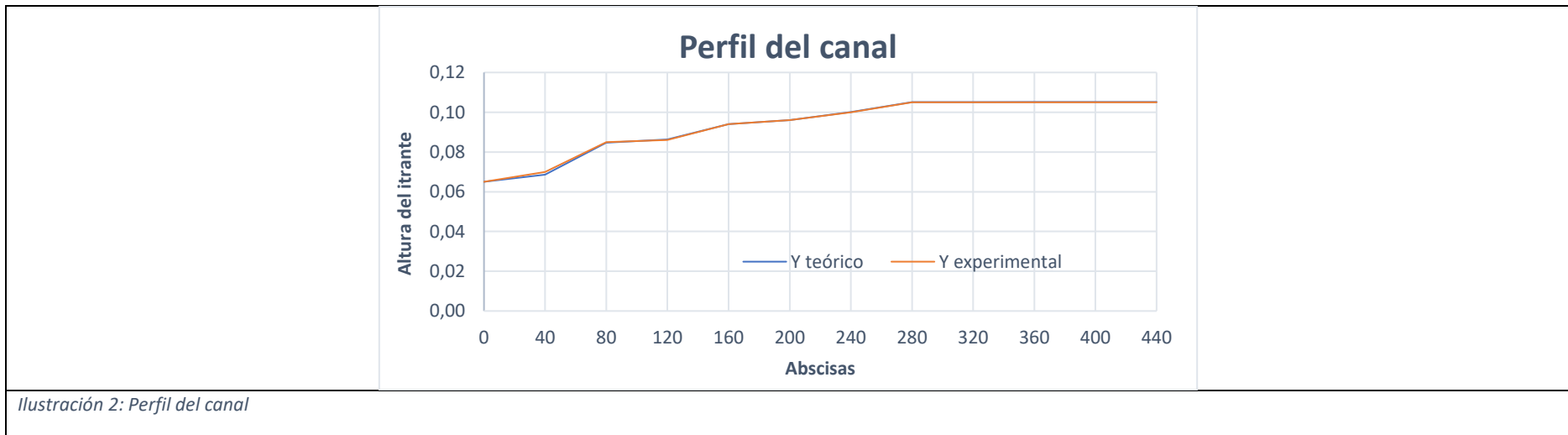


Ilustración 2: Perfil del canal

## 8. Observaciones y conclusiones

¿Cómo se puede adaptar el cálculo de flujo gradualmente variado a canales no prismáticos?

Desarrolle un algoritmo para efectuar el cálculo de flujo gradualmente variado en canales no prismáticos.

## 9. Referencias Bibliográficas:

- [1] V. T. CHOW, *HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Santafe de Bogota: McGraw-Hill, 2000.
- [2] G. E. GAVILAN LEON, *GUIA DE LABORATORIO DE HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Bucaramanga: UISEscuela de Ingenieria Civil, 2001.
- [3] M. V. Béjar, *Hidráulica de canales*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008.