

Universidad  
Industrial de  
Santander



# MANUAL DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA

## PRÁCTICA 5 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING

ESCUELA DE  
**INGENIERIA**  
*Civil*

## Contenido

<b>Laboratorio 5. Coeficiente de Rugosidad de Manning .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Marco teórico.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Estimación del coeficiente de resistencia .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2. Canales con rugosidad compuesta .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Procedimiento .....</b>	<b>9</b>
<b>4. Equipo Utilizado .....</b>	<b>9</b>
<b>5. Datos .....</b>	<b>10</b>
<b>6. Resultados .....</b>	<b>10</b>
<b>7. Cálculo tipo.....</b>	<b>11</b>
<b>8. Resultados y preguntas.....</b>	<b>14</b>
<b>9. Observaciones y Conclusiones.....</b>	<b>14</b>
<b>10. Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>15</b>

## Listado de Ecuaciones

Ecuación 1 .....	4
Ecuación 2 .....	4
Ecuación 3 .....	5
Ecuación 4 .....	5
Ecuación 5 .....	5
Ecuación 6 .....	5
Ecuación 7 .....	5
Ecuación 8 .....	6
Ecuación 9 .....	6
Ecuación 10 .....	6
Ecuación 11 .....	6
Ecuación 12 .....	6
Ecuación 13 .....	6
Ecuación 14 .....	7
Ecuación 15 .....	8
Ecuación 16 .....	8
Ecuación 17 .....	8
Ecuación 18 .....	8
Ecuación 19 .....	8

### **Listado de Ilustraciones**

Ilustración 1: Definición esquemática de las variables para la derivación de la ecuación de Chezy .....	5
Ilustración 2: Canal con rugosidades compuestas .....	7

### **Listado de Tablas**

Tabla 1: Resultados parte 1 .....	10
Tabla 2: Resultados parte 2 .....	10
Tabla 3: Resultados parte 3 .....	11

El diseño de las guías de las prácticas presenciales toma como referencia el trabajo de grado desarrollado por Laiton Suárez (2022), del cual se adaptaron algunos lineamientos metodológicos.

## Laboratorio 5. Coeficiente de Rugosidad de Manning

### 1. Marco teórico

La velocidad media en un flujo uniforme en un canal abierto puede ser aproximada utilizando modelos empíricos desarrollados a partir de resultados experimentales. Estas ecuaciones permiten establecer la relación entre la geometría hidráulica del canal, la pendiente del fondo y la resistencia al flujo ejercida por la superficie (Chow, 2000; Sturm, 2010). En forma general, estas expresiones se representan mediante:

$V_p = CR^X S^Y$	<i>Ecuación 1</i>
------------------	-------------------

Donde:

$V_p$  = Velocidad promedio

$R$  = Radio hidráulico

$S$  = Pendiente longitudinal del canal

$X, Y$  = Coeficientes

$C$  = Coeficiente de resistencia

Dentro de estas formulaciones se encuentran la expresión de **Chezy (1789)** y la de **Manning (1890)**, ampliamente utilizadas en el análisis y diseño de canales debido a su aplicabilidad en diferentes condiciones de superficie (Henderson, 1966).

Para comprender el principio del flujo uniforme, se debe considerar que la fuerza que impulsa al fluido es la gravedad, que actúa paralela al fondo del canal. Esta fuerza puede modelarse como:

$F_m = W \sen \theta = \gamma A L \sen \theta$	<i>Ecuación 2</i>
--	-------------------

Donde:

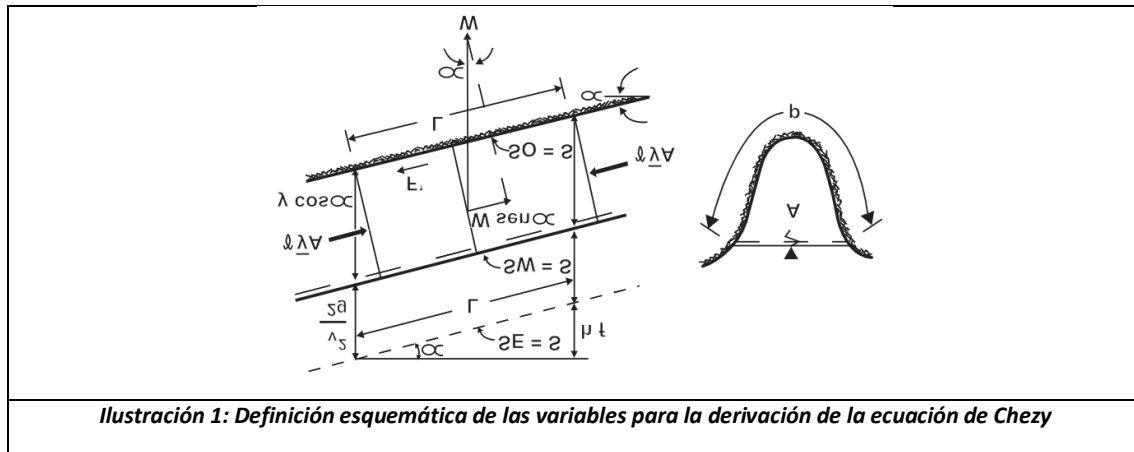
$W$  = Peso del fluido dentro del volumen de control

$\gamma$  = Peso específico del fluido

$A$  = Área de la sección transversal

$L$  = Longitud del volumen de control

$\theta$  = Ángulo de pendiente longitudinal del canal



Cuando el ángulo es pequeño, puede emplearse la aproximación  $\sin \theta \approx S$ , siendo esta una condición típica en canales hidráulicos.

La fricción generada entre el agua y el perímetro mojado origina una fuerza de resistencia que puede representarse como proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo:

$F_r \propto V_p^2$	<b>Ecuación 3</b>
---------------------	-------------------

Para un canal con longitud  $L$  y perímetro mojado  $P$ , la fuerza resistente es:

$F_r = L P K V_p^2$	<b>Ecuación 4</b>
---------------------	-------------------

Donde  $K$  es un coeficiente de proporcionalidad que depende de las características del canal.

Al equilibrar la fuerza motriz y la fuerza resistente—condición fundamental del flujo uniforme—se obtiene:

$\gamma A S_0 = P K V_p^2$ $V_p = \left( \frac{\gamma}{K} \right) \sqrt{R S_0}$	<b>Ecuación 5</b>
---	-------------------

De esta relación se introduce el coeficiente de Chezy  $C$ :

$C = \frac{\gamma}{K}$	<b>Ecuación 6</b>
------------------------	-------------------

Dando lugar a la formulación más utilizada en hidráulica de canales:

$V_p = \frac{\phi}{n} R^{2/3} S^{1/2} \text{ o } Q = \frac{\phi}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$	<b>Ecuación 7</b>
--	-------------------

Donde  $n$  es el coeficiente de Manning, asociado a la rugosidad del canal. Esta expresión puede convertirse a unidades inglesas aplicando un ajuste en el factor numérico:

$\phi = \left[ \frac{m^{1/3}}{s} \right] \rightarrow \phi = 3.28^{1/3} \left[ \frac{ft^{1/3}}{s} \right] = 1.486 \left[ \frac{m^{1/3}}{s} \right]$	<b>Ecuación 8</b>
--	-------------------

$V_p = \frac{1.486}{n} R^{2/3} S^{1/2}$	<b>Ecuación 9</b>
---	-------------------

Como ambas ecuaciones (Chézy y Manning) describen el mismo fenómeno, se puede establecer una relación directa entre los coeficientes  $C$  y  $n$ :

$C = \frac{\phi}{n} R^{1/6}$	<b>Ecuación 10</b>
------------------------------	--------------------

### 1.1. Estimación del coeficiente de resistencia

Una de las principales dificultades en ingeniería hidráulica es la selección adecuada del coeficiente de rugosidad o resistencia  $n$ , ya que su valor depende de múltiples variables como la textura de la superficie, la presencia de vegetación, la alineación del canal, y las condiciones de sedimentación o erosión, entre otras (Arcement & Schneider, 1989).

Algunos estudios destacan que, de forma análoga a lo que sucede en tuberías, el comportamiento del coeficiente de rugosidad puede relacionarse con parámetros como el número de Reynolds y la rugosidad relativa (Roberson et al., 1998; Chaudhry, 2008):

$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$	<b>Ecuación 11</b>
--------------------------------------	--------------------

$R = \frac{A}{P} = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = \frac{D}{4} \rightarrow D = 4R$	<b>Ecuación 12</b>
--	--------------------

$\frac{h_f}{L} = S = \frac{f V_p^2}{8 R g}$	<b>Ecuación 13</b>
---	--------------------

Entonces



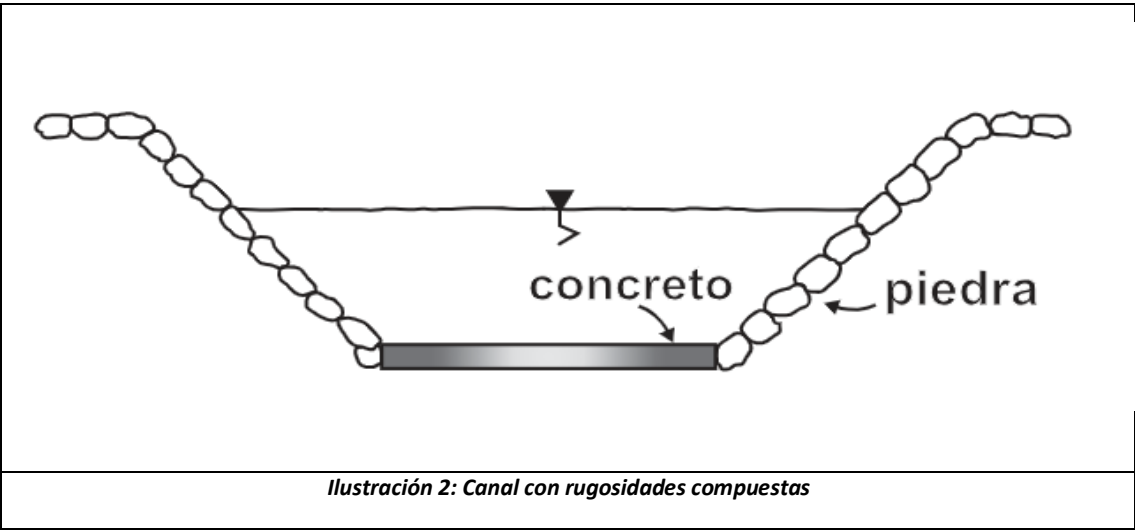
$n = \phi R^{1/6} \left[ \frac{f}{8g} \right]^{1/2} \text{ y } C = \left[ \frac{f}{8g} \right]^{1/2}$	<b>Ecuación 14</b>
---	--------------------

Por este motivo se recurre a tablas basadas en observaciones experimentales y a la experiencia de campo para estimar valores confiables de  $n$  (Bejar, 2008; López & Rivera, 2022).

### 1.2. Canales con rugosidad compuesta

En la mayoría de los canales naturales, y en algunos artificiales, el perímetro mojado está formado por diferentes materiales o zonas con rugosidades distintas. Esto genera variaciones en la resistencia al flujo a lo largo de la sección transversal, por lo que no es adecuado emplear un único valor de rugosidad sin una evaluación específica previa (Chow, 2000).

En estos casos, el área hidráulica se divide en varias subsecciones, como se muestra en la Ilustración 2. Cada subsección posee su propio coeficiente de Manning  $n_i$  y su propio perímetro mojado  $P_i$ . El objetivo es determinar un valor equivalente de rugosidad  $n_{eq}$  para representar a toda la sección de forma uniforme (Arcement & Schneider, 1989).



Existen varios métodos para calcular la rugosidad equivalente. Entre los más utilizados se encuentran:

- **Método de velocidades iguales:** Propuesto por Horton y aplicado después por Einstein y Banks, supone que la velocidad media del flujo es igual en cada subsección:

$V_p = V_{p1} = V_{p2}$	<b>Ecuación 15</b>
-------------------------	--------------------

De esta suposición se obtiene:

$n_{eq} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n P_i n_i^{1.5}}{P} \right]^{2/3}$	<b>Ecuación 16</b>
--	--------------------

$P$ : Perímetro mojado en la sección completa.

$P_i$ : Perímetro mojado de cada subsección

- **Método de esfuerzos cortantes:**

Considera que la suma de las fuerzas cortantes individuales debe igualar la fuerza cortante total:

$n_{eq} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n P_i n_i^2}{P} \right]^{1/2}$	<b>Ecuación 17</b>
--	--------------------

- **Método del gasto total:**

Asume que el caudal total es la suma de los caudales parciales (Henderson, 1966):

$n_{eq} = \frac{P R^{5/3}}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{P_i R_i^{5/3}}{n_i} \right)}$	<b>Ecuación 18</b>
--	--------------------

Donde:

$R_i$ : Radio hidráulico de cada subsección

$R$ : Radio hidráulico de la sección completa

- **Método de Cox (1973):**

Propone una formulación adicional para estimar el  $n_{eq}$  basándose en la distribución geométrica:

$n_{eq} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (A_i n_i)^{3/2}}{A} \right]^{2/3}$	<b>Ecuación 19</b>
--	--------------------



Cada técnica ofrece resultados satisfactorios dependiendo del tipo de canal y de la variación en las rugosidades. Normalmente se elige el método con la hipótesis que mejor se ajuste a las condiciones físicas del cauce o al enfoque del análisis requerido (Ponce, 2014; USACE, 1991)

## **2. Objetivos**

- 1) Conocer la ecuación de Manning y su utilidad.
- 2) Verificar la utilidad para la estimación de  $n$  de la ecuación de Manning, comparando el valor del coeficiente obtenido experimentalmente en el valor teórico correspondiente al de un canal de vidrio.
- 3) Establecer las condiciones de flujo para cada caudal.
- 4) Analizar los resultados obtenidos y los posibles factores de error, plantear soluciones para minimizar los posibles errores.

## **3. Procedimiento**

- 1) Medir el ancho  $B$  y la longitud del canal (entre apoyos).
- 2) Encender el sistema de bombas para que se inicie el flujo por el canal (ver video).
- 3) Medir el caudal tal cual como se hizo en la práctica 1 (ver video de la práctica).
- 4) Fijar una pendiente en el canal con la ayuda del gato hidráulico.
- 5) Tomar 3 lecturas de la profundidad en diferentes puntos a lo largo del canal una vez el flujo en el canal se haya estabilizado.
- 6) Variar la pendiente del canal y repetir el paso 5.
- 7) Variar el caudal en el canal cerrando un poco las llaves del canal y repetir los pasos 3, 4 y 5.
- 8) Repetir el paso 6 (variando nuevamente la pendiente del canal).

## **4. Equipo Utilizado**

- Canal rectangular de vidrio.
- Regla, flexómetro o metro.
- Sistema de bombeo.
- Gato hidráulico

## 5. Datos

<b>Q1[m<sup>3</sup>/s]</b>	0.00057143
----------------------------	------------

<b>Delta Z [cm]</b>	<b>Y1 [cm]</b>	<b>Y2[cm]</b>	<b>Y3[cm]</b>
<b>1</b>	1.9	1.84	1.99
<b>2</b>	1.65	1.56	1.71

<b>Q2[m<sup>3</sup>/s]</b>	0.000625
----------------------------	----------

<b>Delta Z [cm]</b>	<b>Y1 [cm]</b>	<b>Y2[cm]</b>	<b>Y3[cm]</b>
<b>1</b>	1.68	1.77	1.79
<b>2</b>	1.44	1.4	1.3

## 6. Resultados

<b>Delta Z [cm]</b>	<b>So</b>	<b>Y1 [cm]</b>	<b>Y2 [cm]</b>	<b>Y3 [cm]</b>	<b>Yprom [m]</b>
1	0.392%	1.90	1.84	1.99	0.019
2	0.784%	1.65	1.56	1.71	0.016
1	0.392%	1.68	1.77	1.79	0.017
2	0.784%	1.70	1.40	1.30	0.015
<b>Tabla 1: Resultados parte 1</b>					

<b>P [m]</b>	<b>A[m<sup>2</sup>]</b>	<b>R [m]</b>	<b>Q [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>n Exp</b>	<b>%E</b>
0.188	0.003	0.015	571.43E-6	0.0193	75.322%
0.183	0.002	0.013	571.43E-6	0.0216	96.094%
0.185	0.003	0.014	0.000625	0.0154	39.728%
0.179	0.002	0.012	0.000625	0.0166	50.743%
<b>Tabla 2: Resultados parte 2</b>					

Fr	Yc [m]	Ac [m <sup>2</sup> ]	Pc [m]	Rc [m]	Sc	Tipo de flujo
0.461	0.0113944	0.0017	0.1728	0.0099	1.9579%	Subcritico
0.579	0.0113944	0.0017	0.1728	0.0099	1.9579%	Subcritico
0.576	0.0120958	0.0018	0.1742	0.0104	1.9401%	Subcritico
0.749	0.0120958	0.0018	0.1742	0.0104	1.9401%	Subcritico
<b>Tabla 3: Resultados parte 3</b>						

## 7. Cálculo tipo

Para el cálculo tipo se escogió un  $\Delta H=1$  [cm], para facilidad de calculos se toman todas las unidades del SI.

Pendiente del canal ( $S_0$ )

$$s_0 = \frac{\Delta H}{L_{canal}}$$

$$s_0 = \frac{0,01}{2.55} * 100 = 0.392 \%$$

La  $y_{normal}$  se estima promediando los tres valores medidos para cada caso

$$y_{prom} = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$$

$$y_{prom} = \frac{0.019 + 0.0184 + 0.0199}{3} = 0.019[m]$$

Perimetro mojado ( $P$ )

$$P = 2 * Y_{prom} + b$$

$$P = 2 * 0,019 + 0,15 = 0.188[m]$$

Área mojada ( $A$ )

$$A = y_{prom} * b$$

$$A = 0,019 * 0,15 = 0.003[m^2]$$

Radio Hidráulico (R )

$$R = \frac{A}{P}$$

$$R = \frac{0.003}{0.188} = 0.015[m]$$

Caudal (Qprom), como solo se toma una vez el caudal, entonces Qprom= Q1

$$Q_{prom} = Q_1$$

$$Q_{prom} = 0.000571 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Coefficiente de Manning (n)

$$n_{exp} = \frac{1}{Q} A * R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}}$$

$$n_{exp} = \frac{1}{0.000571} 0.003 * (0.015)^{\frac{2}{3}} * (3.92 * 10^{(-3)})^{\frac{1}{2}} = 0.0193$$

El porcentaje de error (%E) puede ser calculado teniendo en cuenta que el coeficiente de Manning para el acrílico es 0.011:

$$\%E = \frac{|n_{teo} - n_{exp}|}{n_{teo}} * 100$$

$$\%E = \frac{|0.011 - 0.0193|}{0.011} * 100 = 75.322\%$$

Para estimar el tipo de flujo en el canal durante el experimento, se calcula el número de Froude. Para calcular la pendiente crítica para el canal, es necesario calcular la Yc, y estimar la pendiente crítica Sc de la ecuación de Manning y sustituir Yc por Ynormal. El número de Froude para un canal rectangular se define como:

Tirante crítico (Yc)

$$q = \frac{Q}{b} = \frac{0.000571}{0.15} = 3.81 * 10^{(-3)} \left[ \frac{\frac{m^3}{s}}{m} \right]$$

Número de Froude (Fr)

Se asume una gravedad de 9,81 [m/s<sup>2</sup>]

$$Fr = \sqrt{\frac{q^2}{9,81 * y^3}}$$

$$Fr = \sqrt{\frac{3.81 * 10^{(-3)^2}}{9,81 * 0.019^3}} = 0.461$$

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

$$Yc = \sqrt[3]{\frac{3.81 * 10^{(-3)^2}}{9,81}} = 0,0113944[m]$$

Área Crítica (Vc)

$$A_c = b * y_c$$

$$A_c = 0.15 * 0,0113944 = 0.0017[m^2]$$

Perimetro Crítico (Pc)

$$P_c = b + 2 * y_c$$

$$P_c = 0.15 + 2 * 0,0113944 = 0.1728 [m]$$

Radio hidráulico crítico (Rc)

$$Rc = \frac{A_c}{P_c}$$

$$Rc = \frac{0.0017}{0.1728} = 0,0099 [m]$$

Pendiente crítica del canal (Sc)

$$Sc = \left( \frac{Q * n_{exp}}{A_c * R_c^{2/3}} \right)^2$$

$$Sc = \left( \frac{0.000571 * 0,0193}{0.0017 * (0,0099)^{2/3}} \right)^2 = 1.9579\%$$

**Tipo de flujo**

Ya que el número de Froude es menos a 1, estamos tratando un flujo subcríti

## 8. Resultados y preguntas

- 1) Utilice los datos del experimento para clasificar el tipo de flujo (subcrítico, crítico o supercrítico) y explique por qué se presenta ese comportamiento.
- 2) Compare la pendiente crítica  $S_c$  con la pendiente usada en el laboratorio. ¿Qué importancia tiene esta comparación?
- 3) Elabore una gráfica adicional de  **$n$  vs.  $Q$**  (o  $n$  vs.  $y$ ). ¿Qué tendencia observa?
- 4) Grafique el número de Froude  $Fr$  en función de la profundidad y discuta su significado.

## 9. Observaciones y Conclusiones

### A. Relacionadas con el coeficiente de Manning ( $n$ )

- ¿Para qué condiciones en un canal debe utilizarse cada una de las ecuaciones de cálculo de  $n$ ?
- Compare el coeficiente de Manning obtenido experimentalmente con el valor teórico. ¿Qué factores prácticos pueden explicar la diferencia?
- ¿Cómo influye la pendiente del canal en la estimación del coeficiente  $n$ ? Explique con base en los datos obtenidos.
- Analice cómo varía el valor del radio hidráulico  $R$  con la profundidad y explique cómo esto afecta al cálculo de  $n$ .

### B. Preguntas de aplicación y extensión

- ¿Cómo variarían los resultados si se utilizara un canal trapezoidal en lugar de uno rectangular?
- En un canal natural, ¿qué factores influyen más en la variabilidad del coeficiente de Manning? Cite al menos una referencia.
- ¿Por qué no es adecuado utilizar un único valor de  $n$  para todos los tipos de canales?
- Proponga un procedimiento para mejorar la precisión de la medición del tirante de agua en el laboratorio.

## 10. Referencias Bibliográficas

- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. U.S. Geological Survey.
- Bejar, M. V. (2008). *Hidráulica de canales*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open-channel flow* (2nd ed.). Springer.
- Chow, V. T. (2000). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Cox, R. (1973). Composite roughness in open channels. *Journal of the Hydraulics Division*, 99(11), 2103–2118. American Society of Civil Engineers.
- Escobar, J., & Martínez, P. (2019). Evaluación experimental del coeficiente de Manning en canales artificiales. *Revista Colombiana de Ingeniería Civil*, 12(2), 55–68.
- Einstein, H. A., & Banks, R. B. (1950). *Fluid resistance of composite roughness*. California Institute of Technology.
- Guerrero, A. (2021). Influencia del número de Reynolds en la estimación del coeficiente de Manning. *Ingeniería y Territorio*, 18(1), 25–34.
- Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan.
- Horton, R. E. (1933). Flow resistance in irregular channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 98(1), 1–24.
- Laiton Suárez, B. D. (2022). *Práctica en docencia para mejorar la estrategia de laboratorio del curso de hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil* (Trabajo de grado, modalidad práctica en docencia). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- López, M., & Rivera, D. (2022). Determinación experimental del coeficiente de rugosidad en canales de laboratorio utilizando la ecuación de Manning. *Ingeniería y Aplicaciones*, 7(4), 67–75.
- Ponce, V. M. (2014). *Open-channel hydraulics* (2nd ed.). CRC Press.



Roberson, J. A., Cassidy, J. J., & Chaudhry, M. H. (1998). *Hydraulic engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Sturm, T. W. (2010). *Open channel hydraulics* (2nd ed.). McGraw-Hill.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (1991). *Hydraulic design of flood control channels* (EM 1110-2-1601). U.S. Department of the Army.