

**VALIDACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DEL FLUJO EN UN CANAL DE  
LABORATORIO USANDO HEC-RAS**

Corporación Universitaria Remington  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
INGENIERIA CIVIL

LUIS FELIPE CUESTA BARRIO  
Asesor: Juan Mauricio Bedoya Soto  
Proyecto de grado  
2026.

## **Dedicatoria**

Esta investigación está dedicada a Dios primeramente por ser mi apoyo y sustento, y desde luego a mi madre, familiares y amigos cercanos que de una u otra manera aportaron al crecimiento personal y profesional en este proceso.

### **Agradecimientos**

A Dios agradezco por darme la fuerza y sabiduría para afrontar cada reto de este maravilloso aprendizaje, a mi madre que con su tenacidad dio la motivación para que todo lo mejor de ella se transmitiera a mi hasta el final de su existencia, esto para que yo llegara hasta acá.

## Tabla de Contenidos

Resumen.....	7
Palabras clave.....	7
1 INTRODUCCIÓN .....	12
2 MARCO TEORICO.....	14
2.1 HIDRÁULICA Y FLUJO EN CANALES .....	14
2.1.1 Flujo en canales abiertos.....	14
2.1.2 Ecuaciones fundamentales del flujo en canales .....	15
2.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA COMPUTACIONAL .....	15
2.2.1 Aspectos experimentales del flujo en canales de laboratorio .....	16
2.2.2 Contraste teórico-experimental.....	16
2.2.3 Aplicaciones y relevancia del estudio.....	17
2.3 ASPECTOS BASICOS DEL FLUJO EN CANALES .....	17
2.4 TIPOS DE CANALES.....	18
2.4.1 Canales artificiales hidráulicos .....	19
2.4.2 Canales Rectangulares .....	20
2.5 MODELOS NUMERICOS PARA SIMULAR FLUJO EN CANALES .....	23
2.5.1 Modelos numéricos y ecuaciones de Saint-Venant .....	23
2.5.2 Hipótesis para la formulación de las ecuaciones de Saint-Venant .....	23
2.5.3 Ecuación de continuidad.....	24
2.5.4 Ecuación de cantidad de movimiento .....	24
2.5.5 Modelos de fricción hidráulica .....	24
2.5.6 Energía específica y régimen de flujo.....	25
2.5.7 Relevancia y límites de aplicación.....	25
2.6 MODELO HEC-RAS .....	25
2.6.1 Introducción general al sistema HEC-RAS .....	26
2.6.2 Filosofía general del sistema de modelado .....	26
2.6.3 Capacidades principales del programa.....	27
2.6.4 Interfaz de usuario.....	27

2.6.5	Análisis de flujo permanente .....	28
2.6.6	Simulación de flujo no permanente .....	29
2.6.7	Transporte de sedimentos y límites móviles.....	30
2.6.8	Análisis de la calidad del agua.....	31
2.6.9	Gestión de datos, gráficos e informes .....	31
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	33
3.1	ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....	34
3.1.1	NIVEL LOCAL .....	34
3.1.2	NIVEL NACIONAL.....	36
3.1.3	NIVEL INTERNACIONAL.....	37
4	OBJETIVOS .....	38
5	METODOLOGIA.....	39
5.1	Características del Canal Rectangular del Laboratorio.....	39
5.2	Enfoque y tipo de investigación.....	41
5.3	Método de investigación .....	42
5.4	Metodología y técnicas empleadas .....	42
5.4.1	Análisis teórico .....	42
5.4.2	Experimentación en laboratorio.....	42
5.4.3	Simulación numérica con HEC-RAS.....	43
5.4.4	Población, muestra o estudio de caso .....	43
5.4.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	43
5.4.6	Plan de análisis y procesamiento de datos .....	44
6	RESULTADOS.....	45
6.1	TOMA DE DATOS EN LABORATORIO EN EL CANAL EXPERIMENTAL	
	45	
6.1.1	Datos experimentales del canal y datos tomados.....	45
6.1.2	Resultados obtenidos .....	46
6.2	MODELACIÓN NÚMERICA DEL CANAL CON HEC - RAS .....	53
6.2.1	Entrada de datos .....	53
6.2.2	Resultados.....	58

6.3	CONTRASTE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL EN EL CANAL.....	63
7	CONCLUSIONES .....	69
8	ANEXOS .....	72
8.1	OBSERVACIONES .....	72
8.2	RECOMENDACIONES.....	73
8.3	CALCULOS ESPECIFICOS RELACIONADOS CON LA BOMBA DEL CANAL.....	74
9	REFERENCIAS.....	76

### Lista de Tablas

Tabla 1 Datos generales del canal.....	40
Tabla 2 Características generales de la Bomba.....	40
Tabla 3 Parámetros canal hidráulico del laboratorio. ....	40
Tabla 4 Datos calculados del canal experimental sección 3. ....	45
Tabla 5 Condiciones hidráulicas medidas.....	46
Tabla 6 Medición de caudales Empírico vs Caudalímetro .....	47
Tabla 7 Medición volumétrica caudal.....	48
Tabla 8 Construcción de una curva de calibración Nivel (H) vs. Caudal (Q) en el canal	48
Tabla 9 Valores del Número de Reynolds calculado.....	49
Tabla 10 perfiles para las secciones (caudales Q). ....	56
Tabla 11 Números de Manning ingresados en HEC - RAS.....	63
Tabla 12 Datos para cálculo del régimen.....	63
Tabla 13 Cálculo de Fr.....	64
Tabla 14 Contraste de resultados Experimento teórica vs HEC- RAS .....	64
Tabla 15 Interpretación contraste coeficiente $n= 0.004$ .....	66

## Lista de Figuras

Figura 1. a. Vista en planta de un canal irregular b. Perfil de la sección asociado a un canal irregular.....	20
Figura 2 Interfaz de usuario HEC - RAS 6.7 y nombres de las funciones principales.....	27
Figura 3 Perfil del flujo del canal rectangular: Diseño HEC-RAS.....	28
Figura 4: Perfil del flujo con diferentes perfiles (caudales).....	29
Figura 5 Generación de la simulación a- b.....	30
Figura 6 Módulo principal de gestión de análisis HEC-RAS.....	31
Figura 7 Módulo de gestión de informes y gráficos HEC-RAS.....	32
Figura 8 a. Perfil de sección del canal, b. Vista general del canal del laboratorio.....	39
Figura 9 Caudalímetro para medir caudal del canal.....	47
Figura 10 Nivel medio (H) Vs Caudal (m).....	49
Figura 11 Tubería del canal Hidráulico.....	50
Figura 12 Bomba del canal.....	50
Figura 13 Compuerta canal.....	51
Figura 14 Limnómetro del canal.....	51
Figura 15 Gato hidráulico de la pendiente del canal de 0° a 9°.....	52
Figura 16 Rejilla de descargue del canal.....	52
Figura 17 Tanque de descargue de agua del canal.....	53
Figura 18. Gestión de proyecto en HEC-RAS.....	54
Figura 19 Creación de la geometría y secciones del canal.....	55
Figura 20 Definición del régimen HEC-RAS.....	55
Figura 21 Definir Manning para perfiles en HEC-RAS.....	56
Figura 22. Ingreso de caudales en HEC-RAS.....	57
Figura 23 Definir condición de borde y nivel aguas abajo HEC - RAS.....	57
Figura 24 Perfil de flujo del canal al final en la sección (4).....	58
Figura 25 Perfil de flujo del canal con los 6 caudales en la sección 2.400.....	59
Figura 26 Perfil de la superficie del agua sección (4) inicio y (0) salida. Para los 6 caudales. .....	59

Figura 27 Resultados del modelo para $n= 0.004$ indicando la sección que coincide con la medición del limnómetro en el laboratorio indicando la elevación del agua (WS Elev.). .....	60
Figura 28 Geometría en la sección 1.400 con $n= 0.004$ donde está el limnómetro usado para medir el nivel experimental en el canal. ....	61
Figura 29 Definición de los caudales utilizados en HEC-RAS estado estacionario. ....	62
Figura 30 Establecer el Manning para cada perfil en la todas las secciones .....	62
Figura 31 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando $n=0.004$	66
Figura 32 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando $n= 0.007$ .....	67
Figura 33 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando $n=0.010$	67
Figura 34 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando $n= 0.013$ . .....	68
Figura 35 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando $n=0.015$	68

## RESUMEN

Este proyecto analiza el flujo en un canal experimental del laboratorio de la Universidad Remington, sede Medellín, contrastando resultados numéricos y experimentales, para ello, se realizan mediciones y experimentos directos en el canal, que permiten obtener datos precisos sobre variables hidráulicas como el caudal, la velocidad y el perfil del flujo, estos datos experimentales se comparan con simulaciones computacionales realizadas mediante el software HEC-RAS, cuyo propósito es modelar el comportamiento del fluido bajo condiciones similares a las del experimento.

El análisis comparativo permite validar los modelos hidráulicos implementados en el software y evaluar su precisión frente a la realidad, identificando las limitaciones de los enfoques teóricos ante las condiciones prácticas, los resultados obtenidos ofrecen un panorama integral que combina la teoría con la práctica, aportando tanto a la mejora de la enseñanza en ingeniería hidráulica como al desarrollo de herramientas de simulación más precisas y confiables para la gestión y diseño de sistemas hidráulicos abiertos en canales rectangulares de laboratorios utilizados para mediciones de este tipo de investigaciones.

Este sistema integrado de software, diseñado para su uso interactivo en un entorno multitarea, el cual consta de una interfaz gráfica de usuario (GUI), componentes de análisis independientes, capacidades de almacenamiento, gestión de datos, gráficos, mapas y generación de informes, también permite realizar cálculos unidimensionales de flujo constante, unidimensionales y bidimensionales de flujo inestable, cálculos de transporte de sedimentos - lecho móvil, modelado de la temperatura y Calidad del Agua.

Es una aplicación adecuada para alcanzar un objetivo óptimo en términos de diseño y modelado de construcción en canales hidráulicos rectangulares, automatizando cada procedimiento adecuado para este tipo de investigación.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **Caudal (Q):** Cantidad de agua por unidad de tiempo que lleva un cauce o corriente.
- **Canal:** Es una obra estructural elaborada para conducir las aguas para luego ser distribuidas.

- **Velocidad del flujo (V):** La rapidez con la que el agua se mueve a través del canal.
- **Pendiente (S):** La inclinación longitudinal del canal, que afecta la velocidad del flujo.
- **Rugosidad (n):** La resistencia que ofrece el material del canal al flujo del agua, afecta la velocidad y el cálculo del caudal de Manning.
- **Ancho (b) y profundidad (y) del canal:** Dimensiones fundamentales para determinar la capacidad y eficiencia del canal.
- **Revancha:** Espacio libre entre el nivel máximo del agua y el borde superior del canal, para evitar desbordamientos.
- **Área hidráulica (A):** La sección transversal del canal ocupada por el agua.
- **Perímetro mojado (P):** La longitud del contorno del canal en contacto con el agua.
- **Radio hidráulico (R):** Una relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado, que indica la eficiencia del canal.
- **Ecuación de Manning:** Se utiliza para dimensionar canales abiertos y relaciona el caudal con la pendiente, rugosidad, área y perímetro mojado

## 1 INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento del flujo en canales abiertos constituye un aspecto fundamental de la ingeniería hidráulica, debido a su aplicación directa en el diseño, evaluación y operación de diversas obras hidráulicas. Así como en la planificación de estrategias para el control de inundaciones y la gestión eficiente de los recursos hídricos, el estudio de este tipo de flujo permite comprender la interacción entre variables hidráulicas como el caudal, la velocidad y la profundidad, las cuales influyen de manera determinante en el desempeño de canales tanto naturales como artificiales (Chaudhry, 2008; Houghtalen et al., 2016; Brunner, 2022), en este marco, la Universidad Remington, sede Medellín, dispone de un laboratorio hidráulico dotado con un canal experimental que posibilita la realización de mediciones directas del flujo bajo condiciones controladas, facilitando el análisis detallado de los fenómenos hidráulicos observados.

El presente proyecto tiene como objetivo principal desarrollar un contraste teórico-experimental del comportamiento del flujo en el canal de laboratorio, integrando los datos obtenidos experimentalmente con simulaciones numéricas realizadas mediante el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), esta herramienta computacional es ampliamente utilizada en estudios hidráulicos debido a su capacidad para representar el flujo en canales abiertos y ríos, permitiendo estimar variables hidráulicas relevantes y evaluar la validez de los modelos teóricos que describen el comportamiento del flujo en sistemas reales (USACE, 2023).

La combinación de resultados experimentales y modelos computacionales permite contrastar los supuestos teóricos empleados en la hidráulica de canales, identificar posibles discrepancias entre los resultados simulados y los datos medidos, y analizar las causas asociadas a dichas diferencias, este enfoque integrado contribuye al fortalecimiento del conocimiento teórico y práctico, al tiempo que favorece el desarrollo de modelos hidráulicos más confiables y ajustados a condiciones reales de operación (Henderson, 1966). Asimismo, el proyecto aporta a la formación académica de estudiantes y profesionales de la ingeniería civil, al promover el uso de herramientas de simulación especializadas y el análisis crítico de información experimental.

El diseño hidráulico de un canal rectangular implica la determinación adecuada de sus dimensiones geométricas, como el ancho y la profundidad, así como de la pendiente longitudinal necesaria para garantizar un flujo estable y seguro, en este proceso se deben considerar factores como el caudal de diseño, la rugosidad del material del canal, las condiciones de operación y la inclusión de un borde libre que minimice el riesgo de desbordamientos, aspectos fundamentales para asegurar un funcionamiento hidráulico eficiente (Chow, 1959).

El sistema de modelación HEC-RAS fue desarrollado en el marco del proyecto de ingeniería hidrológica de Próxima Generación (NexGen) del Hydrologic Engineering Center, con el propósito de integrar distintas aplicaciones orientadas al análisis hidrológico e hidráulico. Este entorno computacional abarca diversas herramientas destinadas al estudio de procesos como la transformación lluvia-escorrentía, la hidráulica fluvial, la simulación de sistemas de embalses, el análisis de daños por inundaciones y el pronóstico fluvial en tiempo real, lo que lo convierte en una plataforma integral para la gestión de recursos hídricos (USACE, 2023).

HEC-RAS incorpora múltiples componentes de análisis fluvial, entre los que se incluyen el cálculo unidimensional de perfiles de superficie libre para flujos permanentes, la simulación unidimensional y bidimensional de flujos no permanentes, el análisis del transporte de sedimentos bajo diferentes condiciones hidráulicas y la evaluación unidimensional de la calidad del agua, estos módulos comparten una base común de representación geométrica y procedimientos de cálculo hidráulico, lo que garantiza coherencia en los resultados obtenidos, adicionalmente, el software dispone de herramientas de apoyo al diseño hidráulico y de un sistema de integración espacial que permite la visualización y el análisis de resultados mediante cartografía digital, facilitando la interpretación de los fenómenos modelados (USACE, 2023).

## 2 MARCO TEORICO

### 2.1 HIDRÁULICA Y FLUJO EN CANALES

La hidráulica es una disciplina fundamental de la mecánica de los fluidos que se encarga del estudio del comportamiento del agua y otros líquidos, tanto en estado de reposo como en movimiento, en el ámbito de los canales abiertos, el flujo se distingue por la presencia de una superficie libre en contacto directo con la atmósfera, condición que determina que la presión en dicha superficie sea equivalente a la presión atmosférica, el análisis de este tipo de sistemas hidráulicos permite comprender fenómenos relevantes como la variación espacial del nivel del agua, las pérdidas de energía asociadas a la fricción y los cambios en el caudal frente a modificaciones geométricas y de pendiente del canal, aspectos esenciales en el diseño y evaluación de obras hidráulicas (Chow, 1959; French, 1985).

#### 2.1.1 Flujo en canales abiertos

El flujo en canales abiertos puede clasificarse de acuerdo con diversos criterios hidráulicos que facilitan su análisis y caracterización, desde el punto de vista temporal, el flujo puede considerarse permanente cuando las variables hidráulicas permanecen constantes en el tiempo, o no permanente cuando dichas variables presentan variaciones temporales, en relación con la distribución espacial de la velocidad y la profundidad, el flujo puede ser uniforme o no uniforme, dependiendo de si estas magnitudes se mantienen constantes o varían a lo largo del canal, adicionalmente, el régimen del flujo puede identificarse como subcrítico, crítico o supercrítico, según la relación existente entre las fuerzas inerciales y gravitacionales que actúan sobre el fluido (Henderson, 1966).

La identificación del régimen de flujo se realiza comúnmente mediante el número de Froude ( $Fr$ ), el cual se define como la relación entre la velocidad media del flujo y la raíz cuadrada del producto entre la aceleración de la gravedad y la profundidad hidráulica. Matemáticamente, esta relación se expresa como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $V$  representa la velocidad media del flujo,  $g$  corresponde a la aceleración de la gravedad y  $y$  es la profundidad hidráulica, el valor del número de Froude permite establecer el tipo de flujo presente en el canal, siendo un parámetro clave tanto en el análisis teórico como en la interpretación de resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas (Chow, 1959).

### **2.1.2 Ecuaciones fundamentales del flujo en canales**

El comportamiento hidráulico del flujo en canales abiertos se describe mediante las ecuaciones de Saint-Venant, las cuales se derivan de los principios de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento aplicados a un volumen de control, estas ecuaciones permiten modelar el flujo bajo condiciones permanentes y no permanentes, y constituyen la base teórica de numerosos análisis hidráulicos y herramientas computacionales empleadas en la práctica profesional, en particular, los modelos implementados en software especializado como HEC-RAS se fundamentan en estas ecuaciones para simular el comportamiento del flujo en canales y ríos, facilitando la estimación de variables hidráulicas y la evaluación del desempeño de sistemas hidráulicos reales (USACE, 2023).

## **2.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA COMPUTACIONAL**

La modelación hidráulica computacional constituye una herramienta fundamental para el análisis del comportamiento del flujo en canales abiertos, ya que permite representar de forma aproximada los procesos físicos que gobiernan el movimiento del agua mediante el uso de ecuaciones matemáticas resueltas numéricamente, en particular, este tipo de modelación se basa en las ecuaciones de Saint-Venant, las cuales describen la conservación de la masa y la cantidad de movimiento en flujos gradualmente variados, posibilitando la estimación de variables hidráulicas como niveles de agua, velocidades y líneas de energía bajo diferentes condiciones de operación (Chow, 1959; French, 1985).

Dentro de este contexto, el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) se emplea ampliamente en estudios hidráulicos debido a su capacidad para simular el flujo en ríos y canales tanto en una como en dos dimensiones, esta herramienta, desarrollada por el U.S. Army Corps of Engineers, permite analizar flujos permanentes y no permanentes, calcular perfiles de superficie libre, evaluar el comportamiento hidráulico de estructuras y visualizar los resultados de manera gráfica, facilitando la interpretación de los fenómenos estudiados (USACE, 2023). Su aplicación resulta especialmente útil en entornos académicos y experimentales, donde se busca contrastar resultados teóricos con observaciones reales.

### **2.2.1 Aspectos experimentales del flujo en canales de laboratorio**

Los canales hidráulicos de laboratorio ofrecen un entorno controlado que permite la observación directa de los fenómenos asociados al flujo en canales abiertos, en este tipo de instalaciones es posible modificar parámetros como la pendiente longitudinal, la rugosidad del fondo, el caudal circulante y la geometría del canal, lo que facilita el estudio sistemático del comportamiento hidráulico del flujo, las mediciones experimentales se realizan mediante instrumentos como limnímetros, reglas graduadas y dispositivos de medición de caudal, generando datos que sirven como referencia para la validación de modelos numéricos (Henderson, 1966).

### **2.2.2 Contraste teórico-experimental**

El contraste teórico-experimental tiene como objetivo principal evaluar la capacidad del modelo numérico para reproducir adecuadamente los fenómenos observados en el canal de laboratorio, para ello, los resultados obtenidos mediante la simulación en HEC-RAS se comparan con los datos experimentales medidos, analizando el grado de concordancia entre ambos, esta comparación se apoya en indicadores estadísticos como el error relativo, el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), los cuales permiten cuantificar la precisión y confiabilidad del modelo empleado (Moriasi et al., 2007).

### **2.2.3 Aplicaciones y relevancia del estudio**

La integración de la modelación hidráulica computacional con la experimentación en laboratorio contribuye significativamente a una mejor comprensión de los procesos hidráulicos que ocurren en canales abiertos, asimismo, este enfoque combinado mejora la calidad de los análisis y diseños de obras hidráulicas, al permitir la validación de modelos numéricos mediante datos reales, desde el punto de vista académico, este tipo de estudios fortalece el aprendizaje práctico y analítico de los estudiantes de ingeniería civil, promoviendo el desarrollo de competencias en el uso de herramientas modernas de simulación aplicadas a problemas reales de la ingeniería hidráulica.

## **2.3 ASPECTOS BASICOS DEL FLUJO EN CANALES**

El análisis del flujo en canales abiertos constituye uno de los pilares de la hidráulica, debido a que describe el comportamiento del agua en sistemas donde la superficie libre se encuentra en contacto directo con la atmósfera, a diferencia de los conductos cerrados, en los canales abiertos el movimiento del fluido está dominado principalmente por la acción de la gravedad, lo que condiciona tanto la distribución de velocidades como la variación del nivel del agua a lo largo del canal, el estudio de este tipo de flujo permite determinar variables hidráulicas fundamentales como el caudal, la velocidad media, la profundidad del flujo y la energía específica, las cuales resultan indispensables para el análisis y diseño de obras hidráulicas tales como canales de riego, sistemas de drenaje, vertederos, aliviaderos y cauces naturales o artificiales (Chow, 1959; French, 1985).

Desde el punto de vista hidráulico, el flujo en canales abiertos puede clasificarse de acuerdo con diferentes criterios que facilitan su análisis, según su variación en el tiempo, el flujo puede considerarse permanente cuando las variables hidráulicas no cambian con el tiempo, o no permanente cuando dichas variables presentan fluctuaciones temporales, de acuerdo con la variación espacial, el flujo puede ser uniforme si la profundidad y la velocidad permanecen constantes a lo largo del canal, o variado cuando estas cambian gradualmente o de manera brusca, asimismo, atendiendo al comportamiento interno del fluido, el flujo puede identificarse como laminar o turbulento, siendo este último el más común en aplicaciones prácticas de ingeniería hidráulica (Henderson, 1966).

El comportamiento del flujo en canales abiertos se describe mediante un conjunto de ecuaciones fundamentales que representan principios físicos básicos, entre estas se encuentran la ecuación de continuidad, la ecuación de energía y la ecuación de cantidad de movimiento, las cuales permiten modelar el flujo bajo diferentes condiciones hidráulicas y geométricas (Streeter, Wylie & Bedford, 1998).

La ecuación de continuidad expresa el principio de conservación de la masa y establece que, para un flujo permanente sin aportes ni pérdidas laterales, el caudal se mantiene constante a lo largo del canal, matemáticamente, esta relación se expresa como el producto entre el área transversal del flujo y la velocidad media, lo que permite analizar la relación entre cambios geométricos del canal y variaciones en la velocidad del agua, la ecuación de energía se fundamenta en el principio de conservación de la energía mecánica del flujo, en canales abiertos, esta ecuación permite evaluar la distribución de la energía específica, considerando la contribución de la elevación, la presión y la energía cinética asociada a la velocidad del flujo, su aplicación resulta esencial para el análisis de transiciones hidráulicas y la evaluación de pérdidas de energía debidas a fricción y cambios geométricos (Chow, 1959).

Por su parte, la ecuación de cantidad de movimiento, basada en la segunda ley de Newton, relaciona la variación del momento lineal del fluido con las fuerzas externas que actúan sobre él, en el caso de canales abiertos, estas fuerzas incluyen principalmente el peso del agua, las fuerzas de presión y la resistencia por fricción ejercida por el fondo y las paredes del canal, esta ecuación resulta especialmente útil para el análisis de fenómenos como resaltes hidráulicos y cambios bruscos en el régimen de flujo (Henderson, 1966). En conjunto, estos principios teóricos constituyen la base para la comprensión y modelación del flujo en canales abiertos, y permiten el desarrollo de análisis tanto experimentales como numéricos orientados a la evaluación del comportamiento hidráulico en condiciones controladas y reales.

## **2.4 TIPOS DE CANALES**

Los canales pueden clasificarse atendiendo su origen en canales naturales y canales artificiales (Figura 1a). En el caso de los canales naturales, estos comprenden todos los

cuerpos de agua que se forman y desarrollan sin intervención directa del ser humano. Dentro de esta categoría se incluyen cursos de agua de diversas escalas, que abarcan desde pequeños arroyos localizados en zonas montañosas, pasando por quebradas y ríos de diferente magnitud, hasta grandes ríos, lagos y lagunas. Asimismo, algunas corrientes subterráneas que presentan flujo con superficie libre también pueden considerarse como canales abiertos naturales (Chow, 1959).

Una característica distintiva de los canales naturales es la irregularidad de su geometría (Figura 1b). La forma de su sección transversal suele ser variable a lo largo del cauce, lo que se traduce en cambios significativos en el ancho, la profundidad y la pendiente. De igual manera, la alineación del canal y las propiedades del lecho, como la rugosidad y el tipo de material, presentan variaciones espaciales que influyen de manera directa en el comportamiento hidráulico del flujo. Estas particularidades hacen que el análisis y la modelación de los canales naturales sean más complejos en comparación con los canales de geometría regular (Chaudhry, 2008).

#### **2.4.1 Canales artificiales hidráulicos**

Los canales artificiales hidráulicos son conductos construidos por el ser humano con el propósito de conducir agua de manera controlada para diferentes usos, tales como riego, drenaje, abastecimiento, control de inundaciones, generación de energía y transporte de caudales en sistemas hidráulicos. A diferencia de los canales naturales, estos presentan una geometría previamente definida, con secciones transversales regulares y pendientes diseñadas para garantizar un comportamiento hidráulico predecible y seguro del flujo (Chow, 1959).

En general, los canales artificiales pueden adoptar diversas formas geométricas, siendo las más comunes las secciones rectangulares, trapezoidales y triangulares. La selección del tipo de sección depende de factores como el caudal de diseño, las condiciones topográficas, el material de construcción y los criterios económicos y operativos del proyecto, además, los materiales empleados en su construcción, como concreto, mampostería o revestimientos especiales, influyen directamente en la rugosidad del canal y, por tanto, en las pérdidas de energía y la velocidad del flujo (Chaudhry, 2008).

El diseño hidráulico de los canales artificiales busca asegurar la estabilidad del flujo, evitar procesos de erosión o sedimentación excesiva y mantener condiciones adecuadas de operación durante su vida útil, para ello, se emplean ecuaciones y criterios de la hidráulica de canales abiertos, apoyados frecuentemente por herramientas de modelación numérica que permiten evaluar el desempeño del canal bajo distintos escenarios de operación (USACE, 2016).

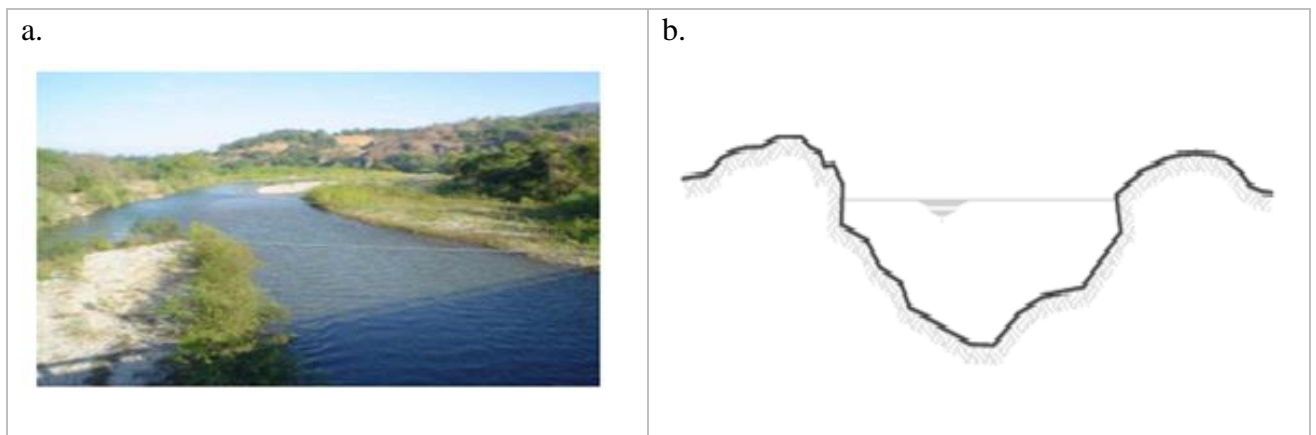


Figura 1. a. Vista en planta de un canal irregular b. Perfil de la sección asociado a un canal irregular

#### 2.4.2 Canales Rectangulares

Los canales rectangulares son una de las geometrías más simples y comúnmente utilizadas en la experimentación hidráulica, en un canal rectangular, la sección transversal está definida por el ancho ( $b$ ) y la profundidad del flujo ( $y$ ). Sus relaciones hidráulicas principales son:

$$\text{Área húmeda } A = b \cdot y$$

$$\text{Perímetro mojado } P = b + 2y$$

$$\text{Radio hidráulico } R = A/P$$

La ecuación de Manning permite relacionar el caudal con la geometría y rugosidad del canal:  $Q = (1/n) A R^{(2/3)} S^{(1/2)}$ , donde  $n$  es el coeficiente de Manning y  $S$  la pendiente, estas expresiones permiten analizar la profundidad crítica, el régimen de flujo y las transiciones entre flujo subcrítico y supercrítico.

Parámetros clave en el diseño de un canal rectangular:

- **Ancho (B):** Determina la capacidad del canal para transportar el fluido.
- **Profundidad (y):** La altura del agua dentro del canal, afecta la velocidad y la capacidad del canal.
- **Pendiente (S):** La inclinación del canal, influye en la velocidad del flujo y la energía necesaria para mover el agua.
- **Caudal (Q):** La cantidad de fluido que pasa por el canal en un tiempo determinado.
- **Rugosidad (n):** Medida de la resistencia al flujo del material del canal, afecta la velocidad del agua.
- **Borde Libre:** La altura adicional por encima del nivel máximo de agua para evitar desbordamientos.

Consideraciones importantes:

- **Eficiencia hidráulica:** Buscar la relación entre ancho y profundidad que minimice la resistencia al flujo y maximice la eficiencia.

- **Estabilidad:** Asegurar que el canal sea estable y no sufra erosión ni daños por el flujo del agua.
- **Materiales:** Seleccionar materiales duraderos y resistentes al agua y a la abrasión.
- **Costos:** Balancear la eficiencia, la durabilidad y los costos de construcción del canal.

Proceso de diseño típico:

1. **Definir el caudal:** Determinar la cantidad de agua que debe transportar el canal.
2. **Seleccionar el material:** Elegir el material del canal, considerando su rugosidad y durabilidad.
3. **Calcular el tirante y el ancho:** Utilizar fórmulas hidráulicas y ecuaciones como la de Manning para determinar el ancho y la profundidad óptimos.
4. **Determinar la pendiente:** Calcular la pendiente necesaria para lograr la velocidad de flujo deseada.
5. **Asegurar el borde libre:** Incorporar un borde libre adecuado para evitar desbordamientos.
6. **Diseño estructural:** Considerar la estabilidad estructural del canal, especialmente en terrenos con pendientes o vulnerables a deslizamientos.

## **2.5 MODELOS NUMERICOS PARA SIMULAR FLUJO EN CANALES**

### **2.5.1 Modelos numéricos y ecuaciones de Saint-Venant**

Los modelos numéricos en hidráulica permiten representar y analizar el comportamiento del flujo en canales abiertos mediante la solución de ecuaciones diferenciales que describen los principios físicos fundamentales del movimiento del agua, estos modelos se apoyan teóricamente en las ecuaciones de Saint-Venant, las cuales expresan la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento en flujos con superficie libre, su aplicación facilita el análisis y diseño de obras hidráulicas, al tiempo que reduce la necesidad de ensayos experimentales extensos y los costos asociados a estos procesos (Chow, 1959; Chaudhry, 2008).

### **2.5.2 Hipótesis para la formulación de las ecuaciones de Saint-Venant**

La derivación de las ecuaciones de Saint-Venant, también conocidas como ecuaciones de aguas someras, se fundamenta en una serie de supuestos que simplifican el comportamiento real del flujo sin comprometer su validez en la mayoría de los problemas de ingeniería hidráulica (Cunge, Holly & Verwey, 1980). Entre las principales hipótesis se consideran las siguientes:

El fluido se comporta como incompresible y newtoniano.

- La pendiente del canal es pequeña y la longitud característica del flujo ( $L$ ) es considerablemente mayor que la profundidad típica ( $H$ ), cumpliéndose la condición  $H/L \ll 1$ , propia de la aproximación de capa delgada.
- La presión se distribuye de forma hidrostática, despreciando las aceleraciones verticales y los términos convectivos verticales significativos.
- La velocidad horizontal presenta una variación vertical moderada, por lo que se emplea un valor promedio de la velocidad en la profundidad.
- El intercambio turbulento vertical se representa mediante términos de fricción empíricos, como los propuestos por Manning, Chezy o Darcy–Weisbach.

Bajo estos supuestos, las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento se integran en la dirección vertical, desde el fondo del canal hasta la superficie libre, obteniéndose la formulación unidimensional de Saint-Venant.

### 2.5.3 Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad expresa la conservación de la masa en flujos no permanentes y se formula, en su forma conservativa, cómo:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l(x, t) \quad \text{Ec. 2}$$

donde  $A$  representa el área hidráulica,  $Q$  el caudal y  $q_l$  los aportes laterales por unidad de longitud. En el caso de un canal rectangular, el área hidráulica se define como  $A = b \cdot h$ , siendo  $b$  el ancho del canal y  $h$  la profundidad del flujo (Chow, 1959).

### 2.5.4 Ecuación de cantidad de movimiento

La ecuación de cantidad de movimiento describe el equilibrio entre las fuerzas que actúan longitudinalmente sobre el flujo. En su forma conservativa, se expresa como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) + F_{ext} \quad \text{Ec. 3}$$

donde  $\eta$  es la cota de la superficie libre,  $S_0$  la pendiente del fondo del canal,  $S_f$  la pendiente de energía asociada a las pérdidas por fricción y  $F_{ext}$  representa fuerzas externas adicionales, generalmente despreciables en estudios de laboratorio. Esta forma conservativa es preferida en los modelos numéricos debido a su capacidad para preservar la masa y manejar adecuadamente discontinuidades hidráulicas (Chaudhry, 2008).

### 2.5.5 Modelos de fricción hidráulica

El cierre del sistema de ecuaciones se realiza mediante relaciones empíricas que permiten estimar la pendiente de fricción, entre las más utilizadas se encuentran la ecuación de Manning, la formulación de Chezy y la expresión de Darcy–Weisbach, las cuales relacionan la velocidad del flujo con el radio hidráulico y la rugosidad del canal, estas expresiones son ampliamente aceptadas para flujos turbulentos en canales abiertos (García, 2008).

### **2.5.6 Energía específica y régimen de flujo**

El análisis del flujo se complementa con el concepto de energía específica, definida como la suma de la profundidad del flujo y la energía cinética por unidad de peso, este concepto permite identificar la profundidad crítica y analizar los cambios de régimen hidráulico, el número de Froude, definido como la relación entre la velocidad del flujo y la velocidad de propagación de ondas gravitacionales, se emplea para clasificar el flujo como subcrítico, crítico o supercrítico, información esencial para el diseño hidráulico seguro (Chow, 1959).

### **2.5.7 Relevancia y límites de aplicación**

Las ecuaciones de Saint-Venant resultan adecuadas para la simulación de flujos en ríos y canales abiertos cuando se cumplen las hipótesis de aguas someras y presión hidrostática. No obstante, su aplicación es limitada en situaciones donde predominan efectos tridimensionales, separaciones de flujo o fenómenos altamente no lineales, en estudios de laboratorio, es fundamental verificar la validez de estas hipótesis mediante el análisis de parámetros adimensionales como la relación H/L y el número de Reynolds (Cunge et al., 1980; USACE, 2016).

## **2.6 MODELO HEC-RAS**

El software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) es una herramienta computacional desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) para el análisis hidráulico de flujos con superficie libre en canales naturales y artificiales, este programa permite realizar simulaciones en una y dos dimensiones, tanto en condiciones de flujo permanente como no permanente, así como calcular perfiles de la superficie libre y analizar el comportamiento hidráulico de diversas estructuras como puentes, alcantarillas, vertederos y presas (USACE, 2016).

En el presente proyecto, HEC-RAS se emplea para reproducir numéricamente las condiciones hidráulicas observadas en el canal experimental del laboratorio de la Universidad Remington, sede Medellín, con el propósito de comparar los resultados teóricos y experimentales. Este contraste permite evaluar la precisión del modelo numérico

y analizar la validez de los supuestos teóricos de la hidráulica de canales bajo condiciones controladas de laboratorio, tal como recomiendan estudios previos en modelación hidráulica aplicada (Chaudhry, 2008).

### **2.6.1 Introducción general al sistema HEC-RAS**

HEC-RAS forma parte del conjunto de herramientas desarrolladas por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center), dentro del programa de software de ingeniería hidrológica de Próxima Generación (NexGen). Este programa integra múltiples aplicaciones orientadas al análisis hidrológico e hidráulico, entre las que se destacan: el modelado lluvia–escorrentía mediante HEC-HMS, la simulación hidráulica fluvial con HEC-RAS, la operación de sistemas de embalses con HEC-ResSim, el análisis de daños por inundaciones mediante HEC-FDA y HEC-FIA, y el pronóstico hidrológico en tiempo real a través del sistema CWMS (USACE, 2016).

El objetivo principal de HEC-RAS es proporcionar una plataforma integrada para el análisis hidráulico, combinando rutinas de cálculo, visualización gráfica y manejo de datos espaciales, lo que facilita su aplicación tanto en estudios académicos como en proyectos profesionales de ingeniería hidráulica.

### **2.6.2 Filosofía general del sistema de modelado**

HEC-RAS está diseñado como un sistema de software integrado que opera de manera interactiva en entornos multitarea. El programa se compone de una interfaz gráfica de usuario (GUI), módulos independientes de análisis hidráulico, herramientas de almacenamiento y gestión de datos, capacidades gráficas avanzadas, funciones de mapeo espacial y utilidades para la generación de informes técnicos. Un aspecto relevante del sistema es que todos sus módulos comparten una representación geométrica común y rutinas de cálculo hidráulico consistentes, lo que garantiza coherencia entre los diferentes tipos de análisis (USACE, 2016).

### 2.6.3 Capacidades principales del programa

El software HEC-RAS permite realizar análisis hidráulicos unidimensionales y bidimensionales en redes completas de canales, ríos, llanuras de inundación y zonas protegidas por diques. Entre sus principales capacidades se incluyen las siguientes:

### 2.6.4 Interfaz de usuario

La interacción del usuario con el programa se realiza mediante una interfaz gráfica diseñada (Figura 2) para facilitar el ingreso, edición y visualización de la información sin sacrificar la eficiencia computacional. La GUI permite la gestión de archivos de proyecto, la edición de datos geométricos y de flujo, la ejecución de análisis hidráulicos, la visualización gráfica de resultados, la elaboración de mapas de inundación y la generación de informes técnicos, además de contar con herramientas de ayuda en línea (USACE, 2016).

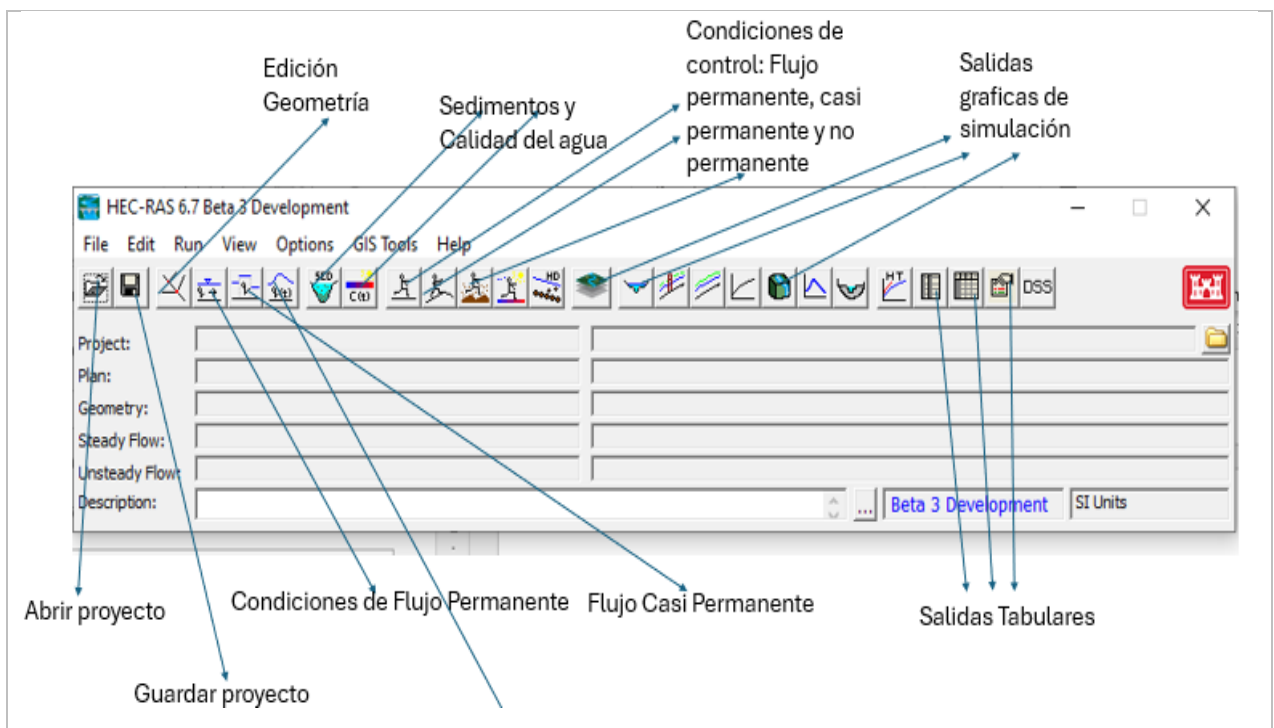


Figura 2 Interfaz de usuario HEC - RAS 6.7 y nombres de las funciones principales.

### 2.6.5 Análisis de flujo permanente

En HEC - RAS el módulo de flujo permanente está orientado al cálculo de perfiles de la superficie libre en flujos gradualmente variados como se ve en la Figura 3 y la Figura 4, considerando regímenes subcríticos, supercríticos o mixtos. El procedimiento de cálculo se basa principalmente en la ecuación de energía unidimensional, incorporando las pérdidas por fricción mediante la ecuación de Manning y las pérdidas por contracción o expansión mediante coeficientes empíricos. En situaciones donde el flujo presenta variaciones rápidas, como resaltos hidráulicos o confluencias, se emplea la ecuación de cantidad de movimiento (Chow, 1959; USACE, 2016).

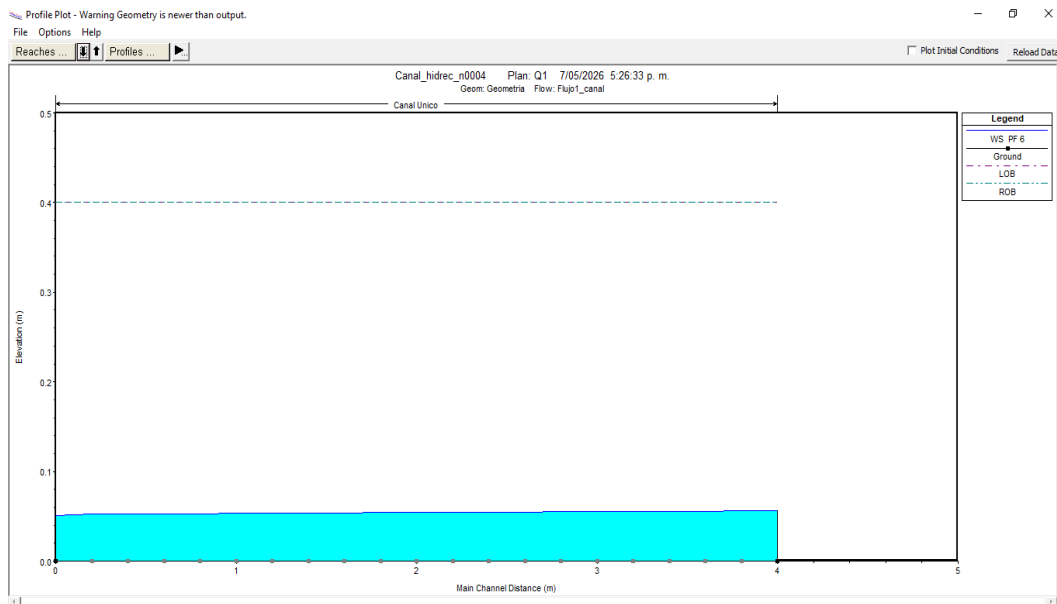


Figura 3 Perfil del flujo del canal rectangular: Diseño HEC-RAS

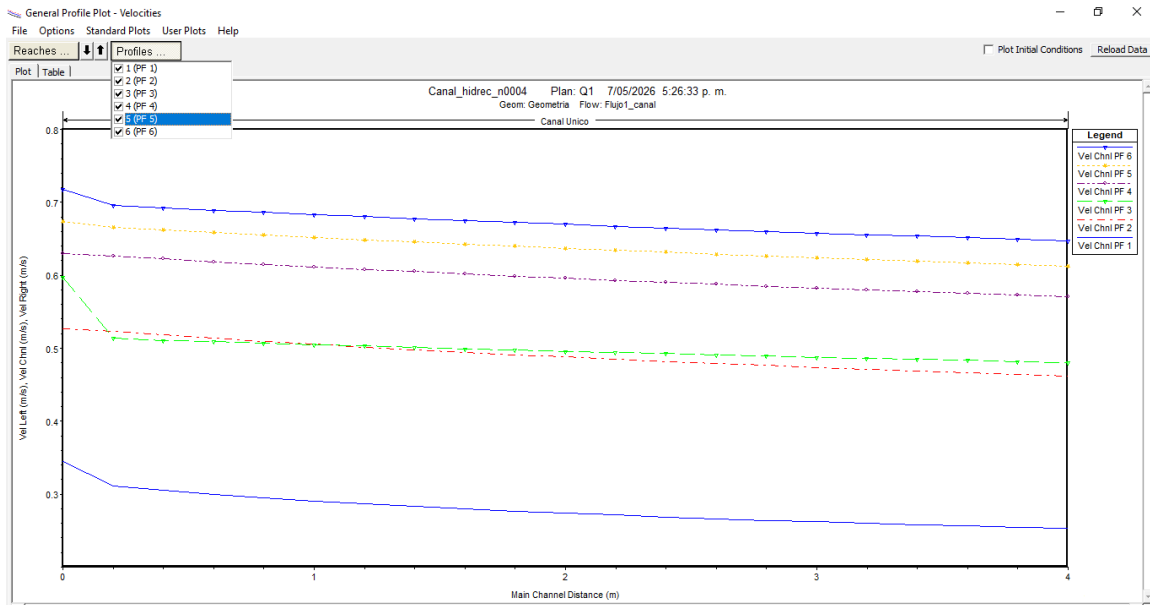


Figura 4: Perfil del flujo con diferentes perfiles (caudales)

Este módulo es ampliamente utilizado en estudios de gestión de llanuras de inundación, evaluación de invasiones de cauce y análisis del impacto de modificaciones geométricas o de la construcción de diques y otras estructuras hidráulicas.

### 2.6.6 Simulación de flujo no permanente

El componente de flujo no permanente permite simular la propagación temporal del flujo en una, dos o en configuraciones combinadas 1D/2D, Figura 4 (a – b). Este módulo resulta especialmente útil para el análisis de avenidas, rotura de presas, desbordamientos de diques y sistemas complejos de canales y llanuras de inundación. Las ecuaciones hidráulicas empleadas corresponden a las ecuaciones de Saint-Venant, resueltas mediante esquemas numéricos conservativos que garantizan la estabilidad y precisión del modelo (Chaudhry, 2008).

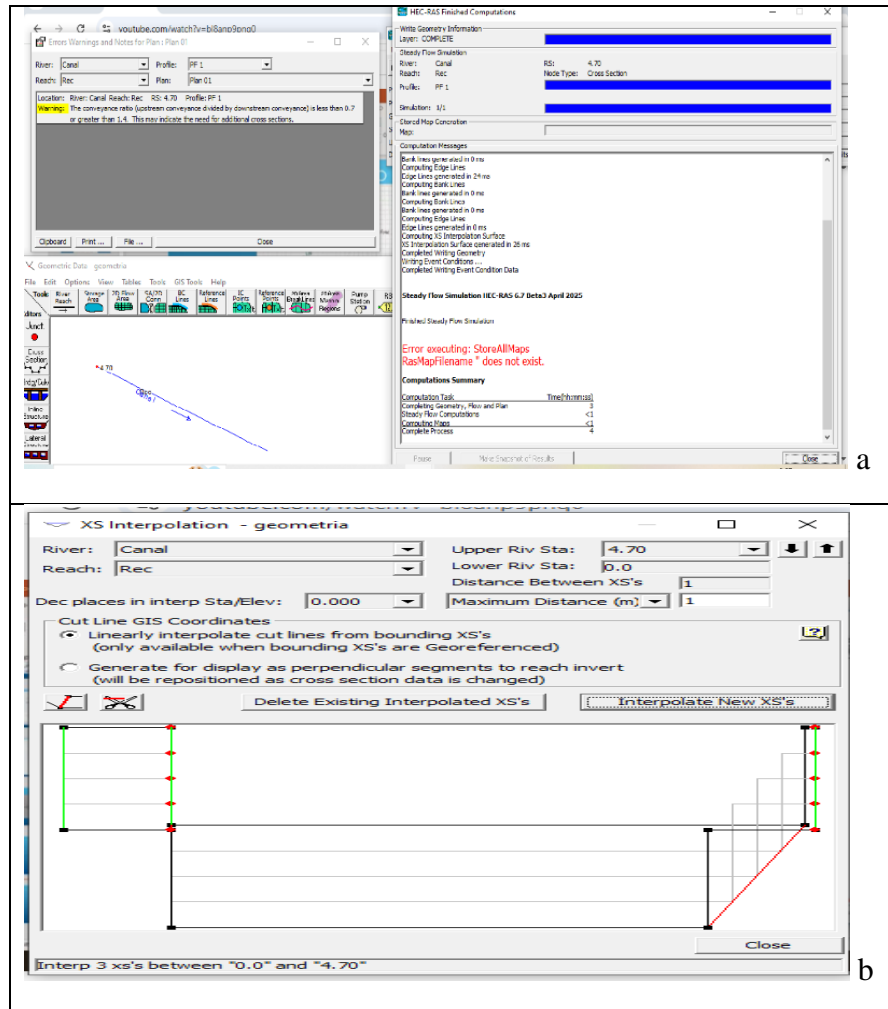


Figura 5 Generación de la simulación a- b

## 2.6.7 Transporte de sedimentos y límites móviles

HEC-RAS también incluye un módulo para el análisis del transporte de sedimentos y la evolución morfológica del cauce en una y dos dimensiones. Este componente permite simular procesos de erosión y sedimentación a mediano y largo plazo, considerando la granulometría del material del lecho y diferentes formulaciones empíricas para el transporte de sedimentos. Su aplicación es relevante en estudios de embalses, dragado de canales, estabilidad de cauces y evaluación de impactos hidráulicos asociados a cambios en el régimen de caudales (García, 2008).

## 2.6.8 Análisis de la calidad del agua

El módulo de calidad del agua permite simular la temperatura y el transporte de diversos constituyentes, como oxígeno disuelto, nutrientes y materia orgánica, en flujos unidimensionales. Estas capacidades amplían el alcance del software hacia el análisis ambiental de sistemas fluviales Figura 6, siendo especialmente útiles en estudios de gestión de recursos hídricos y evaluación de impactos ambientales (USACE, 2016).

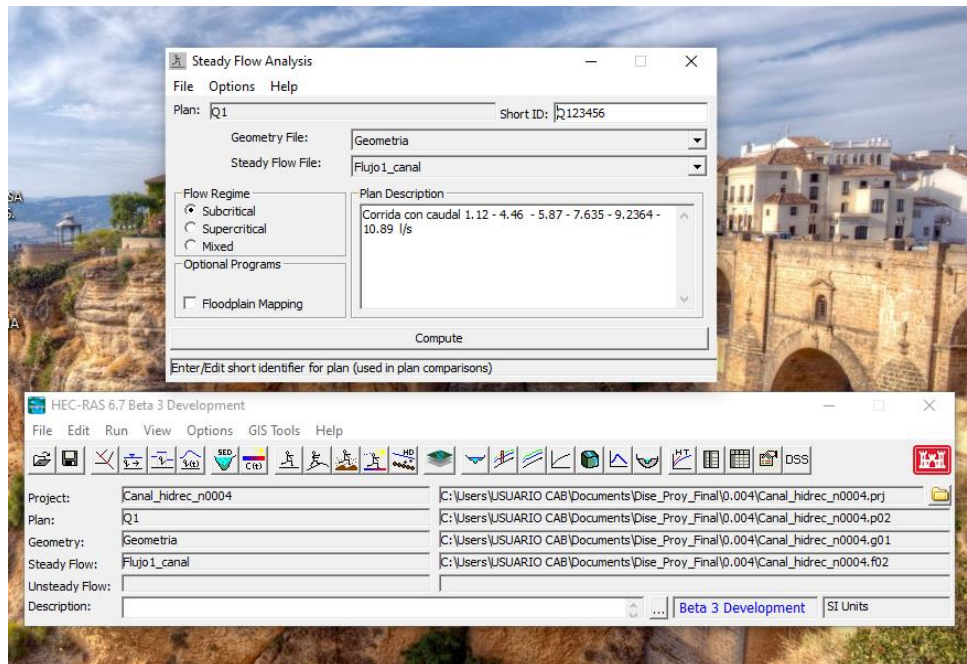


Figura 6 Módulo principal de gestión de análisis HEC-RAS.

## 2.6.9 Gestión de datos, gráficos e informes

El almacenamiento de la información en HEC-RAS se realiza mediante archivos planos, archivos binarios, el sistema HEC-DSS y el formato HDF5, lo que facilita la interoperabilidad con otros programas de modelación hidráulica e hidrológica como se muestra en la Figura 7. La visualización de resultados incluye gráficos bidimensionales y tridimensionales, perfiles longitudinales, secciones transversales, hidrogramas y mapas de inundación generados a través del módulo HEC-RAS Mapper. Asimismo, el software permite exportar resultados en formato tabular y generar informes personalizados para su documentación técnica y académica.

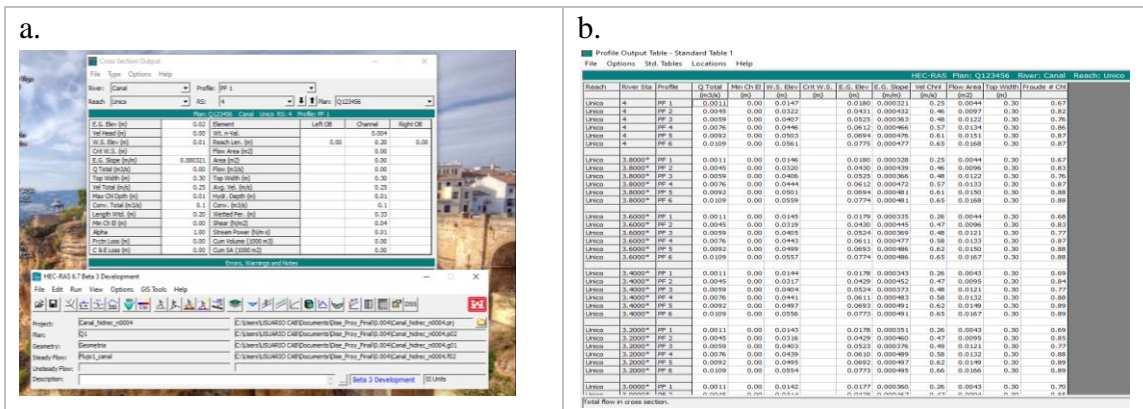


Figura 7 Módulo de gestión de informes y graficos HEC-RAS.

### 3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presente investigación se centra en las dificultades asociadas al diseño de canales hidráulicos rectangulares, tanto desde un enfoque teórico como experimental, especialmente en lo relacionado con el proceso de levantamiento y recolección de información hidráulica, estas dificultades se evidencian principalmente en las limitaciones existentes en términos de precisión y control durante la medición del flujo de agua, lo cual incide directamente en la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos, la falta de exactitud en la medición de variables hidráulicas fundamentales puede afectar de manera significativa el desarrollo óptimo de la investigación y la correcta interpretación del comportamiento del flujo dentro del canal.

Adicionalmente, se reconoce que el planteamiento y la aplicación manual de ecuaciones hidráulicas, así como la ejecución de demostraciones analíticas, presentan limitaciones importantes al momento de describir el comportamiento real del flujo en canales rectangulares, estas dificultades se hacen más evidentes cuando se intenta reproducir de forma manual fenómenos hidráulicos complejos, lo que puede conducir a resultados poco representativos o de difícil validación, en este sentido, la aplicación directa de modelos teóricos sin un adecuado respaldo experimental puede generar inconsistencias en el análisis hidráulico.

La complejidad inherente a la demostración escrita de los procedimientos hidráulicos, sumada a los tiempos de espera asociados a la toma de datos, la comprensión de los métodos empleados, la formulación de modelos y el análisis de los resultados obtenidos, convierte el proceso en una tarea dispendiosa, esta situación dificulta la obtención de respuestas claras y comprensibles, especialmente para quienes esperan una entrega eficaz y un análisis que facilite la interpretación de los resultados de manera sencilla y coherente.

Por otra parte, es importante destacar que el diseño de un canal rectangular hidráulico requiere una evaluación detallada de diversos aspectos relevantes para garantizar un funcionamiento seguro, eficiente y duradero, entre estos aspectos se encuentran los materiales a utilizar, los cuales influyen directamente en la rugosidad, la resistencia estructural y el comportamiento hidráulico del canal. Un diseño adecuado debe considerar cuidadosamente estos factores con el fin de asegurar condiciones de operación estables a lo largo del tiempo.

Asimismo, los elementos geométricos del canal desempeñan un papel fundamental en el análisis hidráulico, las propiedades geométricas de la sección transversal, definidas por la forma del canal y la profundidad del flujo, permiten caracterizar el comportamiento del agua y son ampliamente utilizadas en los cálculos de flujo, estas propiedades resultan esenciales para el desarrollo del análisis manual, aunque su interpretación y aplicación pueden generar dificultades al momento de presentar y explicar el modelo de forma clara y comprensible.

Finalmente, la evaluación del comportamiento del flujo no permanente representa un desafío adicional, dado que su análisis se basa en la aplicación de las ecuaciones de Saint-Venant, la recolección de datos necesarios para este tipo de análisis, cuando se realiza de manera manual, suele presentar imprecisiones que limitan la exactitud de los resultados, esta situación refuerza la necesidad de complementar los métodos tradicionales con herramientas que permitan mejorar la precisión del análisis y facilitar la comprensión del comportamiento hidráulico en canales rectangulares.

### **3.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA**

#### **3.1.1 NIVEL LOCAL**

En el ámbito local, la Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA), a través de la Facultad de Ingeniería Civil y el área de Mecánica de Fluidos y Recursos Hidráulicos, desarrolló un estudio experimental orientado a la obtención y análisis de los diferentes perfiles de flujo presentes en canales rectangulares, empleando un modelo físico diseñado

y adaptado al canal existente en el laboratorio de hidráulica (Diaz, 2001). Para ello, se construyó un modelo compuesto por paneles de acrílicos ensamblados longitudinal y transversalmente mediante marcos y travesaños de madera, lo que permitió una integración adecuada con la infraestructura del canal previamente instalado.

La generación de los perfiles hidráulicos se logró mediante la implementación de dos dispositivos de control, aguas arriba del canal se instaló una compuerta de acrílico, alojada en una estructura de madera, cuya función fue regular la formación de perfiles supercríticos, por su parte, aguas abajo se dispuso una estructura tipo celosía destinada a garantizar el control y la estabilidad de los perfiles subcríticos, para cada perfil analizado, y considerando tres valores distintos de caudal, se realizaron mediciones sistemáticas de la profundidad del agua mediante un limnómetro con alta precisión, efectuando lecturas cada 10 cm a lo largo de una longitud total de 2,50 m.

Los datos experimentales obtenidos fueron comparados con los resultados teóricos calculados a través del método del paso estándar. Posteriormente, se elaboraron representaciones gráficas que relacionan las diferencias entre las profundidades medidas y las calculadas con variables hidráulicas como la pendiente de energía, la velocidad y la profundidad teórica en cada sección del canal, a partir de estos resultados, se organizaron tablas comparativas que permitieron identificar el comportamiento teórico-experimental de cada perfil de flujo, el análisis evidenció que los perfiles ubicados en la zona 1 presentaron diferencias mínimas entre los valores experimentales y teóricos, mientras que aquellos correspondientes a la zona 3 mostraron discrepancias más significativas, con la excepción del perfil C3, el cual presentó un comportamiento más cercano al modelo teórico.

Cabe resaltar que en este estudio no se formuló una hipótesis previa relacionada con la precisión o el comportamiento de los perfiles de flujo, en su lugar, se desarrolló un análisis teórico-experimental exploratorio, reconociendo que, aunque los perfiles tienden a agruparse según la zona hidráulica, no todos siguen un patrón uniforme, esta situación dejó planteada la necesidad de futuras investigaciones que profundicen en dichas diferencias, como complemento, se elaboró material audiovisual que documenta el montaje del canal y

el desarrollo de las prácticas de laboratorio, el cual fue concebido como apoyo didáctico para los estudiantes de ingeniería civil.

### **3.1.2 NIVEL NACIONAL**

A nivel nacional, la Universidad Industrial de Santander (UIS), en Bucaramanga, implementó en el año 2023 una estrategia orientada al fortalecimiento del componente práctico de la asignatura Hidráulica de Canales, perteneciente al programa de Ingeniería Civil, tradicionalmente, este componente se apoyaba en nueve prácticas de laboratorio diseñadas para reforzar los conceptos fundamentales del curso, no obstante, se identificaron limitaciones significativas asociadas al desgaste del equipamiento existente y a la falta de flexibilidad de la infraestructura, lo cual restringía la diversidad de experiencias experimentales y favorecía la repetición de las mismas actividades académicas (Malaver Nieto, 2023).

Como respuesta a esta problemática, se propuso una estrategia de diversificación basada en el uso de simulaciones computacionales, con el objetivo de promover el aprendizaje activo y el desarrollo de competencias aplicadas en los estudiantes, en este contexto, se diseñaron nueve objetos virtuales de aprendizaje, cada uno orientado a complementar una práctica de laboratorio específica, dichos objetos incluyen guías detalladas para la descarga, instalación e implementación de herramientas computacionales, así como una estructura pedagógica claramente definida que abarca objetivos, fundamentos teóricos, procedimientos de simulación, entregables y referencias bibliográficas.

Para el desarrollo de las simulaciones se emplearon tres herramientas de software libre: OpenFOAM, H-Canales y HEC-RAS, seleccionadas de acuerdo con los objetivos particulares de cada práctica. Los recursos desarrollados fueron integrados al aula virtual del laboratorio y aplicados durante los semestres académicos 2022-2 y 2023-1. Los resultados de las encuestas aplicadas a estudiantes y auxiliares académicos evidenciaron una mejora significativa en los procesos de aprendizaje, tanto en el componente teórico como en el práctico del curso (Malaver Nieto, 2023).

### **3.1.3 NIVEL INTERNACIONAL**

En el contexto internacional, la Universidad Privada del Norte, en Perú, desarrolló en el año 2020 una investigación orientada a evaluar la eficiencia en el cálculo de parámetros hidráulicos mediante el uso de un canal de pendiente variable y el software HEC-RAS, en la ciudad de Cajamarca (Villena y Alexandra, 2020). El estudio se enfocó en comparar los resultados obtenidos a partir de ensayos experimentales con aquellos derivados del modelamiento computacional, con el fin de determinar el grado de eficiencia del software en el análisis de flujos hidráulicos, la metodología incluyó una revisión bibliográfica sistemática basada en criterios de inclusión y exclusión previamente definidos, tales como el año de publicación, el idioma y la pertinencia temática. La información recopilada fue organizada mediante fichas de resumen y registros de datos, lo que facilitó su posterior análisis, a continuación, se procedió a modelar los ensayos experimentales empleando el software HEC-RAS, y los resultados obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva con el apoyo de herramientas informáticas como Microsoft Excel.

Los resultados evidenciaron una variación relativa entre el 1 % y el 3 % entre los valores experimentales y los obtenidos a través del modelo computacional, a partir de este análisis, se concluyó que el uso de HEC-RAS incrementa la eficiencia en el estudio y modelamiento del flujo hidráulico en aproximadamente un 45 % en comparación con los métodos experimentales tradicionales basados en canales de pendiente variable, destacando así la utilidad de las herramientas computacionales en el análisis hidráulico moderno (Villena y Alexandra, 2020).

## **4 OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Realizar el contraste numérico-experimental del comportamiento del flujo en el canal del laboratorio de la Corporación Universitaria Remington (CUR), Sede Medellín, mediante el uso del software HEC-RAS para evaluar su precisión y aplicabilidad en la simulación hidráulica.

### **ESPECIFICOS**

- Ejecutar mediciones experimentales de una muestra de niveles y caudales en el canal hidráulico rectangular del laboratorio de ingeniería civil de la CUR
- Simular las condiciones experimentales implementadas en el canal hidráulico de la CUR usando el software HEC-RAS.
- Realizar la validación numérico-experimental de los datos obtenidos en laboratorio respecto a los simulados correspondientemente en HEC-RAS para obtener los parámetros de mejor ajuste entre ambas perspectivas.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Características del Canal Rectangular del Laboratorio

A continuación, se describen las características del canal que se encuentra en el laboratorio de la Corporación Universitaria Remington (Figura 8), teniendo en cuenta las medidas del canal rectangular y los elementos con que cuenta.

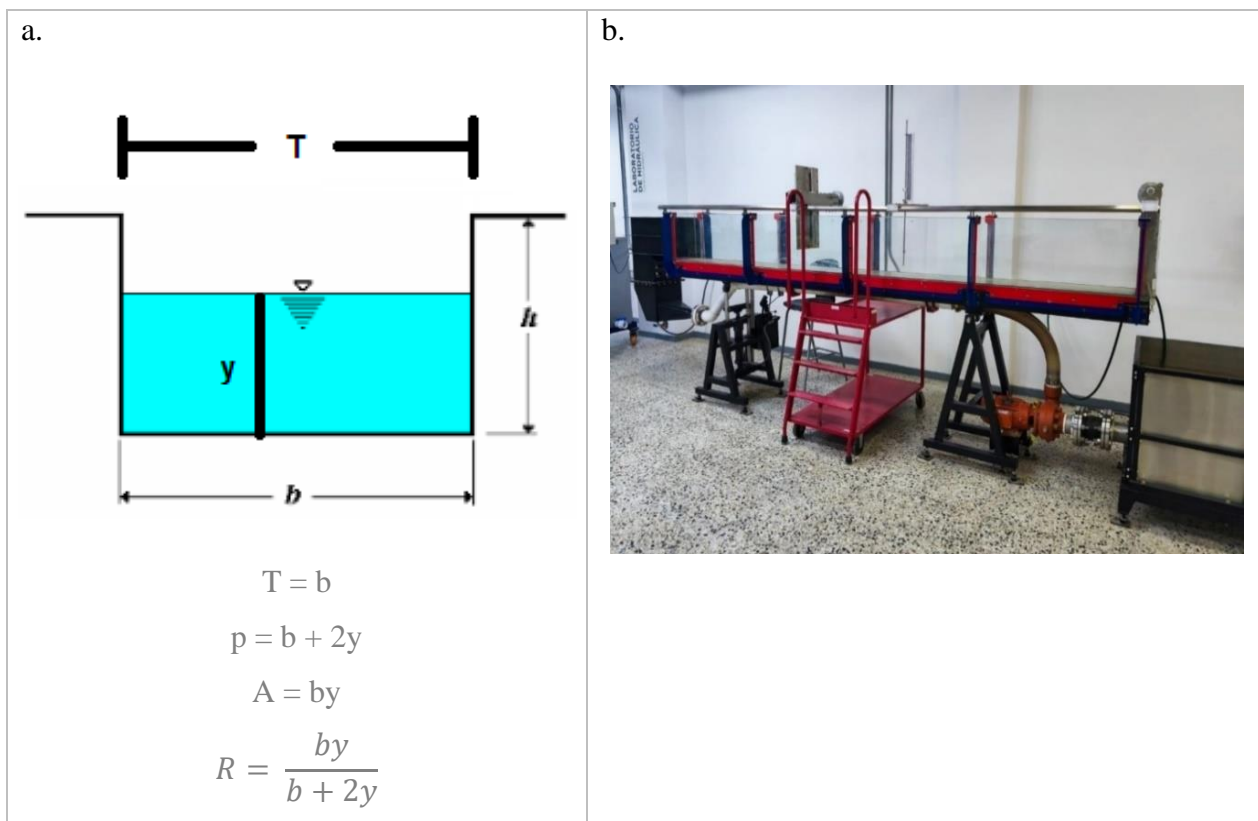


Figura 8 a. Perfil de sección del canal, b. Vista general del canal del laboratorio

A continuación se presentan las dimensiones geométricas y características hidráulicas del canal (Tabla 1), los cuales son relevantes para el estudio. Se trata de un canal hidráulico de una longitud total de 4,73 m, un ancho de 0.3 m y una altura de 0.4 m. El material del canal es primordialmente vidrio de un espesor de 0.05 m. EL canal cuenta con un dispositivo para modular la pendiente en un rango de 0 a 5° y una bomba marca WEG (Tabla 2), que

genera la potenciación y demás funciones al manejo hidráulico de acuerdo con sus parámetros como se describen de manera específica en la Tabla 3.

Tabla 1 Datos generales del canal

<b>DATOS GENERALES DEL CANAL</b>	
Longitud del canal:	4,73 m
Ancho canal:	30 cm
Altura del canal:	40 cm
Diámetro de la tubería:	3"
Ancho tanque descargue	65.8 cm
Alto tanque descargue	66.05 cm
Área del tanque de desagüe:	1.06 m
Material de las paredes del canal	Acrilico
Limnómetro:	1
Pendiente:	$S=0^{\circ}$

Tabla 2 Características generales de la Bomba

<b>CARACTERISTICAS GENERALES DE LA BOMBA DEL CANAL</b>	
Marca	WEG
Modelo	MB 1F/80XX
Tipo de motor	Eléctrico trifásico (asociado)
Fabricado en	Colombia

Tabla 3 Parámetros canal hidráulico del laboratorio.

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
-------------------	--------------

Potencia (HP)	1 HP
Potencia (kW)	0.75 Kw
Tensión (V)	220 / 380 / 440 V
Corriente (A)	3.1/ 1.8/ 1.5 A
Frecuencia (Hz)	60 Hz
Velocidad (rpm)	1.15
Clase de aislamiento	F
Grado de protección	IP55
Rodamientos	6205 (Lado accionamiento) / 6203 CC (lado opuesto)
Montaje	B3D (pies horizontales)
Factor de potencia	$\approx 0.77$ (aprox.)

## 5.2 Enfoque y tipo de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, dado que se fundamenta en la medición, análisis y comparación de variables hidráulicas como caudal, profundidad, velocidad, energía específica y número de Froude, así mismo, corresponde a un estudio de tipo aplicado, ya que utiliza principios teóricos de la hidráulica de canales abiertos para contrastarlos con resultados experimentales y simulaciones numéricas, buscando fortalecer su aplicación práctica de manera efectiva.

Desde el punto de vista metodológico, el estudio se clasifica como descriptivo y comparativo, debido a que describe el comportamiento del flujo en un canal de laboratorio y compara los resultados obtenidos a partir de tres fuentes: teoría hidráulica, experimentación física y modelación numérica mediante el software HEC-RAS.

### **5.3 Método de investigación**

Para alcanzar los objetivos planteados, se emplea el método experimental apoyado por modelación numérica, este método permite reproducir el fenómeno hidráulico bajo condiciones controladas, medir las variables relevantes y contrastar los resultados con las formulaciones teóricas clásicas y los valores obtenidos en la simulación computacional.

El procedimiento metodológico se estructura en tres etapas principales:

- Análisis teórico, basado en las ecuaciones fundamentales del flujo en canales abiertos.
- Experimentación en laboratorio, mediante ensayos controlados en un canal hidráulico rectangular.
- Simulación numérica, utilizando el software HEC-RAS para reproducir las condiciones experimentales y comparar resultados.

### **5.4 Metodología y técnicas empleadas**

#### **5.4.1 Análisis teórico**

En esta fase se aplican las ecuaciones fundamentales de la hidráulica de canales abiertos, tales como la ecuación de continuidad, la ecuación de energía, la ecuación de cantidad de movimiento y las ecuaciones de Saint-Venant, con el fin de determinar analíticamente los parámetros hidráulicos del flujo permanente en el canal, estas expresiones constituyen la base para el contraste posterior con los resultados experimentales y numéricos.

#### **5.4.2 Experimentación en laboratorio**

El estudio experimental se realiza en un canal hidráulico rectangular de laboratorio, bajo condiciones de flujo permanente. Se establecen distintos caudales de operación y se registran variables hidráulicas en secciones previamente definidas del canal, en caso de presentarse un resalto hidráulico, se identifican las profundidades conjugadas y la longitud del fenómeno.

Las condiciones experimentales se controlan cuidadosamente para garantizar la repetibilidad de los ensayos y minimizar fuentes de error asociadas a la instrumentación o a perturbaciones externas.

#### **5.4.3 Simulación numérica con HEC-RAS**

A partir de los datos geométricos y las condiciones de contorno del canal, se construye un modelo hidráulico unidimensional en el software HEC-RAS. Se ingresan los valores de caudal, rugosidad y pendientes, y se simula el flujo permanente. Los resultados obtenidos, tales como perfiles de la superficie libre y profundidades, se comparan con los valores experimentales y teóricos, evaluando el nivel de concordancia entre ellos.

#### **5.4.4 Población, muestra o estudio de caso**

Dado que la investigación no involucra población humana, el estudio se desarrolla bajo la modalidad de estudio de caso, el caso de estudio corresponde a un canal hidráulico rectangular de laboratorio, representativo de las condiciones típicas empleadas en la enseñanza y el análisis de la hidráulica de canales abiertos.

La muestra está constituida por los ensayos experimentales realizados para distintos caudales, seleccionados de manera que permitan analizar el comportamiento del flujo en régimen subcrítico y, de ser posible, en condiciones de transición hidráulica.

#### **5.4.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para la obtención de la información experimental se emplean las siguientes técnicas e instrumentos:

- Medición de caudal, mediante métodos volumétricos o dispositivos de control instalados en el canal.
- Medición de profundidades, utilizando el limnómetro, reglas milimetradas o piezómetros.
- Determinación de velocidades, a partir del caudal y el área hidráulica o mediante métodos indirectos de flotación.
- Registro de datos, a través de hojas de campo y tablas estructuradas en software Excel de microsoft.

En el caso de la simulación numérica, los datos se obtienen directamente de los resultados generados por HEC-RAS, incluyendo perfiles hidráulicos y variables de energía.

#### **5.4.6 Plan de análisis y procesamiento de datos**

Los datos recolectados se organizan en tablas y gráficos para facilitar su interpretación. El análisis se realiza en las siguientes etapas:

- Procesamiento de datos experimentales, calculando promedios, errores relativos y parámetros hidráulicos derivados.
- Comparación teórica–experimental, evaluando las diferencias entre los valores calculados analíticamente y los medidos en laboratorio.
- Contraste experimental–numérico, comparando los resultados experimentales con los obtenidos mediante HEC-RAS.
- Análisis crítico de resultados, identificando las posibles causas de discrepancias, tales como simplificaciones del modelo, hipótesis teóricas o limitaciones experimentales.

Este análisis permite establecer conclusiones sobre la confiabilidad del modelo numérico y la validez de las ecuaciones teóricas en condiciones de laboratorio.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 TOMA DE DATOS EN LABORATORIO EN EL CANAL EXPERIMENTAL

Para el levantamiento de información experimental del canal, se realizó una medición manual utilizando las ecuaciones necesarias, en la cual se obtuvieron los resultados de manera empírica. Además, se establecieron distintas secciones de operación con 6 diferentes caudales y se registraron variables hidráulicas en las secciones previamente definidas del canal. Las condiciones experimentales se controlaron cuidadosamente para garantizar la repetición de los ensayos y minimizar fuentes de error asociadas a la instrumentación o a perturbaciones externas.

#### 6.1.1 Datos experimentales del canal y datos tomados

Para la medición del canal se realiza una verificación de los datos calculados experimentalmente, donde se pudo evidenciar como se muestra en la Tabla 4 los siguientes cálculos.

Tabla 4 Datos calculados del canal experimental sección 3.

Datos del canal	
Área mojada	0,0039 m <sup>2</sup>
Perímetro mojado	0,326 m
Radio hidráulico	0,01196319 m
Espejo de Agua t	0,30 m
Profundidad del flujo (D)	$A/T = 0,0039 \text{ m}^2 / 0,30 \text{ m}$
Régimen hidráulico	(subcrítico)

#### a) Geometría del canal

- Tipo de canal (rectangular)
- Ancho de solera ( $b$ ) = 0,30m
- Pendiente longitudinal ( $S_0$ ) = 0° grados
- Longitud del tramo= 4m, secciones= sección1= 1m, sección 2=1m, sección 3=1m

## b) Condiciones hidráulicas medidas

Tabla 5 Condiciones hidráulicas medidas

<b>Caudales experimentales (m<sup>3</sup>/s)</b>	
Q1	0,00112
Q2	0,00446
Q3	0,00587
Q4	0,007635
Q5	0,0092364
Q6	0,01089
<b>Profundidad observada (m)</b>	
y1	0,013
y2	0,03
y3	0,037
y4	0,044
y5	0,048
y6	0,054
<b>Velocidad media</b>	
Vm1	0,28717949
Vm2	0,49555556
Vm3	0,52882883
Vm4	0,57840909
Vm5	0,64141667
Vm6	0,67222222
<b>Material del canal (Manning)</b>	
n1	0.004
n2	0.007
n3	0.01
n4	0.013
n5	0.015

### 6.1.2 Resultados obtenidos

Para la medición volumétrica del caudal se usó un método volumétrico y un método digital a través de un caudalímetro que pertenece al laboratorio de la universidad (Figura 9). Para el cálculo volumétrico se implementa:

$$Q = \text{Velocidad} * \text{Área}$$

$$Q = \text{Volumen} / \text{tiempo}$$

Inicialmente, para la medición volumétrica, se realizaron 3 mediciones con un recipiente de 3,5 litros de volumen y un cronometro, teniendo en cuenta que es un modelo de medición empírico, el cual no refleja valores con la precisión exacta y hay factores que no lo hacen 100% efectivo, esto quiere decir que, al emplear la fórmula del caudal, que es igual al volumen dividido el tiempo, solo se requirieron los dos materiales.

Así, se logró la comparación del caudal calculado empíricamente con el calculado en el caudalímetro (Tabla 6):

Tabla 6 Medición de caudales Empírico vs Caudalímetro

Q calculado con caudalímetro (l/s)	1,12
Q calculado con recipiente (l/s)	0,90014
Diferencia	0,22



Figura 9 Caudalímetro para medir caudal del canal.

De acuerdo con los datos experimentales medidos, se obtuvieron las condiciones del canal con resultados basado en la sección 3 o sección final del canal hidráulico donde está localizado el limnómetro (Tabla 8). Allí, se construyó la curva de calibración (Figura 10), con respecto a los 6 caudales utilizados en el ensayo, se contrastó el nivel medio en

(X) y los caudales en (Y), esto de manera potencial para determinar que el gráfico se ajusta, debido a que su correlación se acerca mucho a 1. Esto quiere decir que al utilizar matemáticamente la fórmula que proporciona, se hallará un valor muy cercano a lo esperado en cuanto al caudal en el canal. Para verificar con la ecuación, se hace el cálculo reemplazando términos:

Tabla 7 Medición volumétrica caudal.

Mediciones	Volumen del recipiente (l)	Tiempo calculado (s)	Caudal calculado (l/s)
1	3.5	3.62	0.9669
2	3.5	4.2	0.8333
3	3.5	3.845	0.9103
Promedio	3.5	3.8883	0.90014

$$Q = 1139,5 * H^{1,5925}$$

Tabla 8 Construcción de una curva de calibración Nivel (H) vs. Caudal (Q) en el canal

MEDICIONES	% APLICADO DE VELOCIDAD EN EL CANAL	VELOCIDAD EN TUBERIA	CAUDAL	NIVEL MEDIO H	AREA MOJADA (m <sup>2</sup> )	PERIMETRO MOJADO	RADIO HIDRAULICO
1	10	0.22	1.12	0.013	0.039	0.326	0.01196319
2	15	0.87	4.46	0.03	0.009	0.36	0.025
3	20	1.1554	5.87	0.37	0.0111	0.374	0.02967914
4	25	1.5032	7.635	0.044	0.0132	0.388	0.03402062
5	30	1.8181	92364	0.048	0.0144	0.396	0.03636364
6	35	2.14	10.89	0.054	0.0162	0.408	0.03970588

La Figura 10 presenta el gráfico de ajuste potencial:

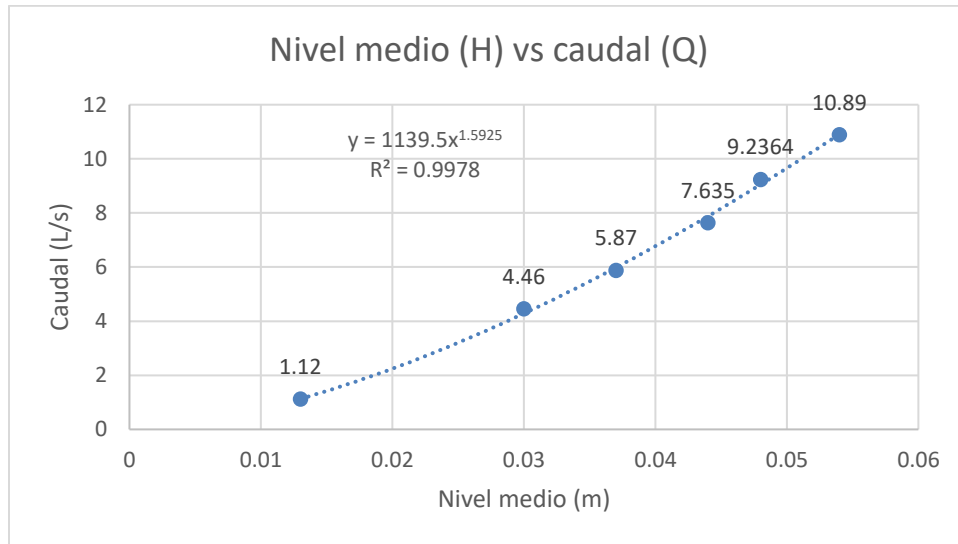


Figura 10 Nivel medio (H) Vs Caudal (m).

Cálculo de Número de Reynolds:

$$NRe = \frac{Di \cdot V \cdot \rho}{\mu}$$

Donde,

Di= Radio hidráulico

V= Velocidad canal

$\rho$ = Densidad del agua

$\mu$ = Viscosidad del agua a una temperatura de 23° C (kg/m\*s)

Tabla 9 Valores del Número de Reynolds calculado

Número de Reynolds		
Mediciones	Valor	Tipo de fluido
Med. 1	3679	NRe < 4000= Flujo de transición
Med. 2	13279	NRe < 4000= Flujo Turbulento
Med. 3	16776	NRe < 4000= Flujo Turbulento
Med. 4	21077	NRe < 4000= Flujo Turbulento
Med. 5	24954	NRe < 4000= Flujo Turbulento
Med. 6	28602	NRe < 4000= Flujo Turbulento

En las siguientes imágenes se presenta el ambiente experimental desarrollado del proceso de medición de caudales y niveles en el laboratorio de la Corporación Universitaria Remington sede Medellín.



Figura 11 Tubería del canal Hidráulico



Figura 12 Bomba del canal



Figura 13 Compuerta canal



Figura 14 Limnómetro del canal



Figura 15 Gato hidráulico de la pendiente del canal de  $0^{\circ}$  a  $9^{\circ}$

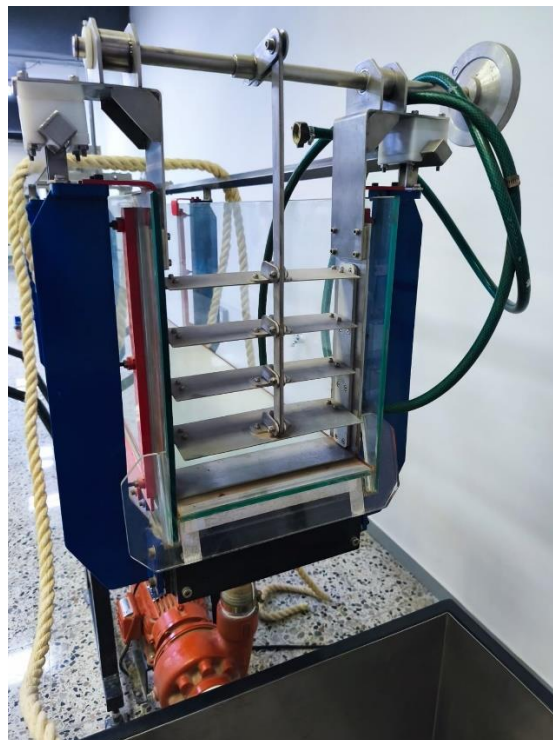


Figura 16 Rejilla de descargue del canal.



Figura 17 Tanque de descargue de agua del canal.

## 6.2 MODELACIÓN NÚMERICA DEL CANAL CON HEC - RAS

### 6.2.1 Entrada de datos

Se presenta el procedimiento en HEC-RAS (paso a paso). De acuerdo con los lineamientos establecidos para la modelación numérica se realiza el ingreso de información obtenida experimentalmente en el canal en el software HEC-RAS, donde se permite la automatización de los datos de la siguiente manera:

#### Paso 1. Crear un nuevo proyecto

- Abrir HEC-RAS
- File → New Project
- Asignar nombre (*Canal Laboratorio Uniremington*)

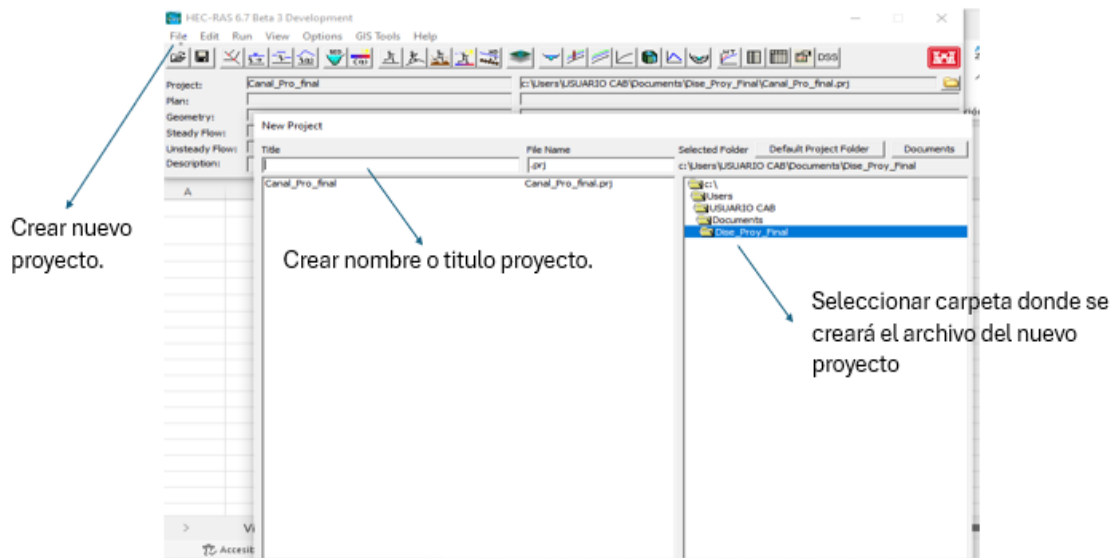


Figura 18. Gestión de proyecto en HEC-RAS

## Paso 2. Definir la geometría del canal

- Geometry Editor
- Crear un River y un Reach
- Definir secciones transversales:
  - Canal rectangular: ancho constante (0.30 m)
  - Usar varias secciones a lo largo del canal (0 m a 4 m)

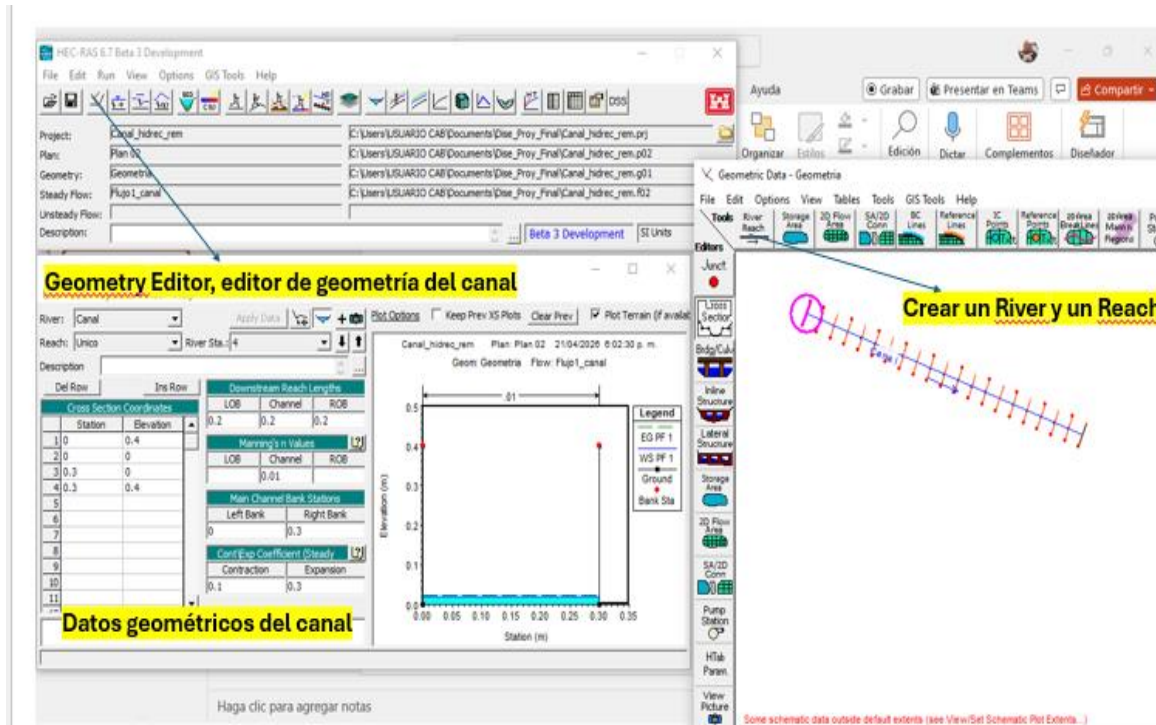


Figura 19 Creación de la geometría y secciones del canal.

- Profundidad del flujo= 0.01
- Velocidad 1= 0.18 m<sup>3</sup>/s, Velocidad 2= 0.35 m<sup>3</sup>/s, Velocidad 3= 0.39 m<sup>3</sup>/s, Velocidad 4= 0.44 m<sup>3</sup>/s, Velocidad 5= 0.48 m<sup>3</sup>/s, Velocidad 6= 0.51 m<sup>3</sup>/s
- Régimen hidráulico (subcrítico)

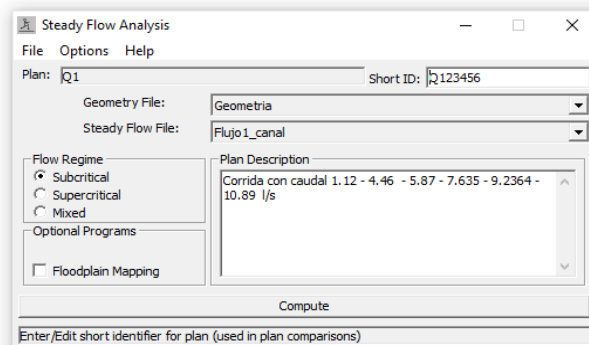


Figura 20 Definición del régimen HEC-RAS.

- Validez del coeficiente de Manning (0.004, 0.007, 0.010, 0.013 y 0.015)

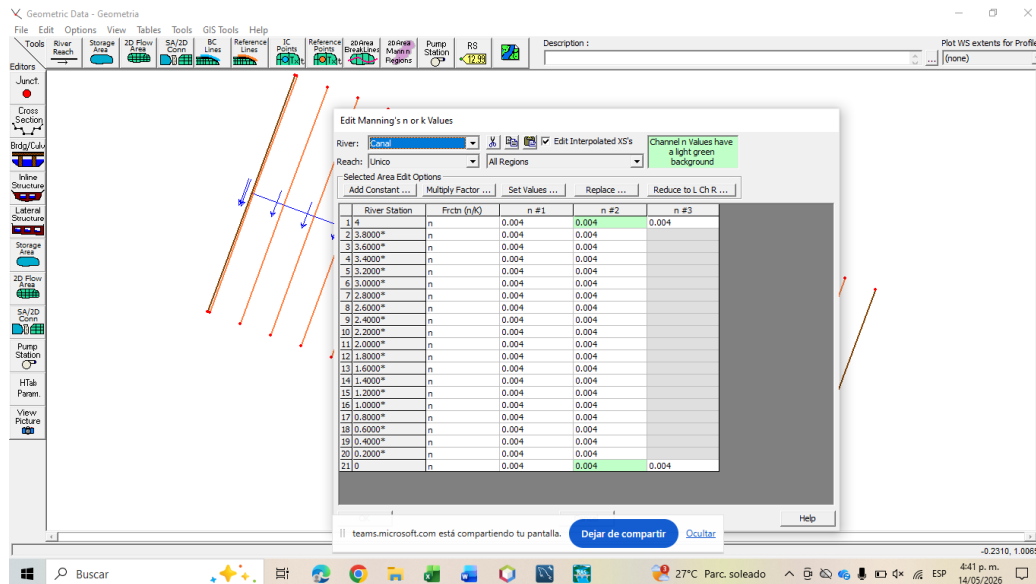


Figura 21 Definir Manning para perfiles en HEC-RAS.

Datos del canal:

#### a) Geometría del canal

- Tipo de canal (rectangular)
- Ancho de solera ( $b$ ) = 0,30m
- Pendiente longitudinal ( $S_0$ ) =  $0^\circ$  grado
- Longitud del tramo = de 0 a 4m (secciones = sección 0 = 1m, sección 4 = 1m, se definieron secciones a cada 20 cm para los tramos de 1 a 4 en el software HEC - RAS.

#### b) Condiciones hidráulicas medidas

Tabla 10 perfiles para las secciones (caudales Q).

Caudales utilizados (m <sup>3</sup> /s)	
Q1	0,00112
Q2	0,00446
Q3	0,00587
Q4	0,007635
Q5	0,0092364
Q6	0,01089

En la Figura 22 se determinó el registro de los caudales o perfiles con una profundidad crítica aguas abajo (Figura 23), en el régimen subcrítico.

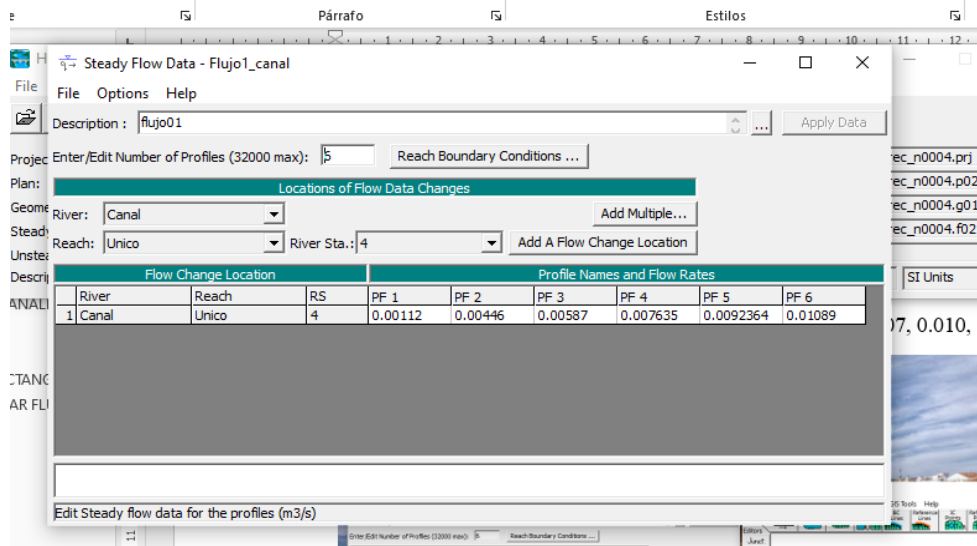


Figura 22. Ingreso de caudales en HEC-RAS.

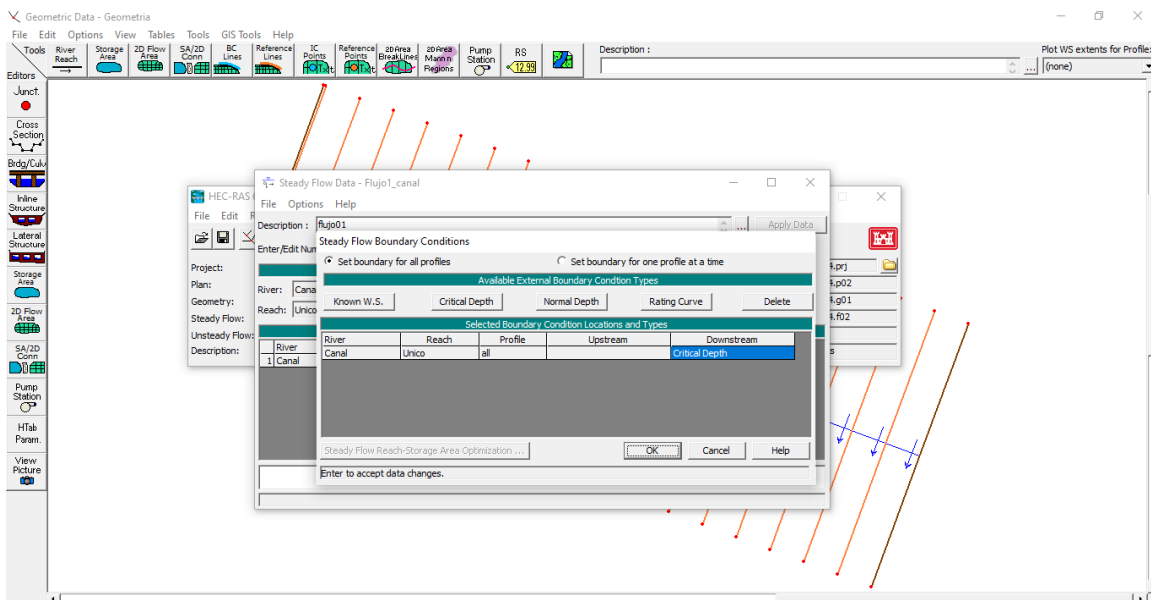


Figura 23 Definir condición de borde y nivel aguas abajo HEC - RAS.

### 6.2.2 Resultados

En la Figura 24 se muestra el resultado de la simulación del perfil del flujo del canal para los 6 caudales registrados en la sección 4 de manera transversal, generando además la leyenda de valor por cada perfil de flujo, con una condición de borde del flujo controlada aguas abajo del canal por la profundidad crítica en el régimen subcrítico.

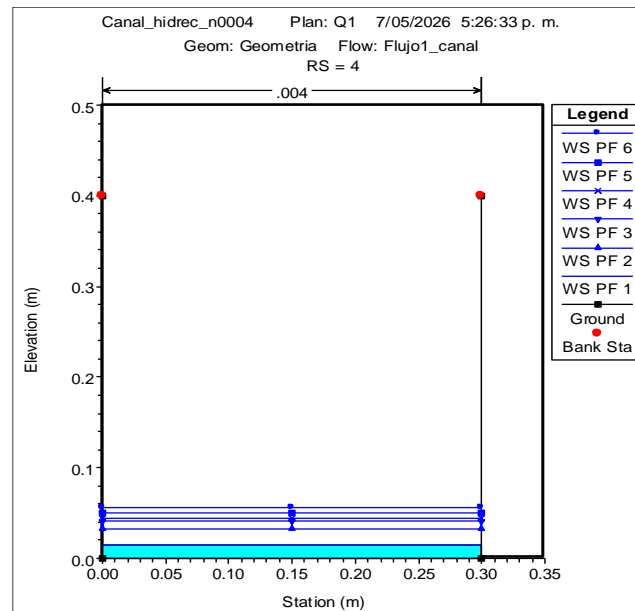


Figura 24 Perfil de flujo del canal al final en la sección (4).

En la Figura 25 el software muestra la simulación grafica de los perfiles del 1- 6 utilizados en la modelación de manera transversal, esto para la sección 2.400, la ejecución muestra además la corrida del comportamiento de cada perfil en dicha sección.

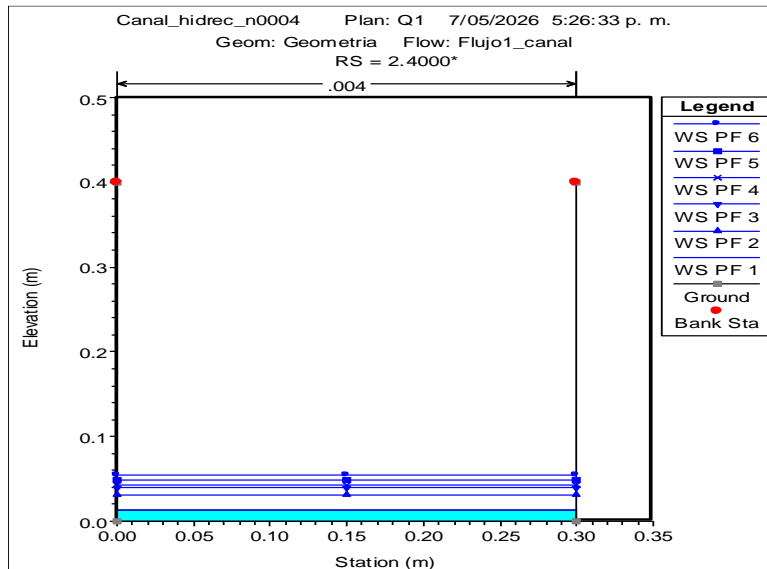


Figura 25 Perfil de flujo del canal con los 6 caudales en la sección 2.400.

La Figura 26 muestra el comportamiento de la corrida en ejecución del HEC-RAS de manera transversal para cada una de las secciones (0 – 4) en el canal hidráulico, también el de los 6 perfiles con respecto al flujo en el régimen subcrítico aguas abajo y la salida o descargue del flujo cerca de la sección 4.

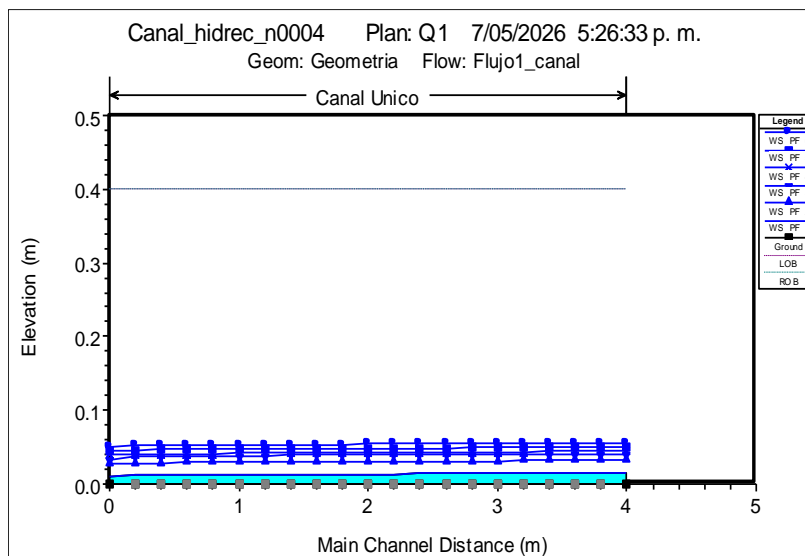


Figura 26 Perfil de la superficie del agua sección (4) inicio y (0) salida. Para los 6 caudales.

La Figura 27 muestra el reporte en HEC-RAS de los resultados del modelo para  $n= 0.004$  indicando la sección que coincide con la medición del limnómetro en el laboratorio indicando la elevación del flujo (WS Elev.), el cual es descrito en la fila para la sección 1.400 con un caudal total de  $Q= 0.0011$  ( $m^3/s$ ) y una WS Elev= 0.0132m.

Profile Output Table - Standard Table 1  
File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Q123456 River: Canal Reach: Unico Profile: PF 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m <sup>2</sup> )	Top Width (m)	Froude # Chl
Unico	4	PF 1	0.0011	0.00	0.0147		0.0180	0.000321	0.25	0.0044	0.30	0.67
Unico	3.8000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0146		0.0180	0.000328	0.25	0.0044	0.30	0.67
Unico	3.6000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0145		0.0179	0.000335	0.26	0.0044	0.30	0.68
Unico	3.4000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0144		0.0178	0.000343	0.26	0.0043	0.30	0.69
Unico	3.2000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0143		0.0178	0.000351	0.26	0.0043	0.30	0.69
Unico	3.0000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0142		0.0177	0.000360	0.26	0.0043	0.30	0.70
Unico	2.8000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0141		0.0177	0.000369	0.26	0.0042	0.30	0.71
Unico	2.6000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0140		0.0176	0.000380	0.27	0.0042	0.30	0.72
Unico	2.4000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0139		0.0176	0.000391	0.27	0.0042	0.30	0.73
Unico	2.2000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0137		0.0175	0.000402	0.27	0.0041	0.30	0.74
Unico	2.0000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0136		0.0174	0.000415	0.27	0.0041	0.30	0.75
Unico	1.8000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0135		0.0174	0.000429	0.28	0.0040	0.30	0.76
Unico	1.6000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0133		0.0173	0.000445	0.28	0.0040	0.30	0.77
Unico	1.4000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0132		0.0173	0.000462	0.28	0.0039	0.30	0.79
Unico	1.2000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0130		0.0172	0.000481	0.29	0.0039	0.30	0.80
Unico	1.0000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0128		0.0171	0.000503	0.29	0.0038	0.30	0.82
Unico	0.8000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0126		0.0171	0.000527	0.30	0.0038	0.30	0.84
Unico	0.6000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0124		0.0170	0.000555	0.30	0.0037	0.30	0.86
Unico	0.4000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0122		0.0170	0.000587	0.31	0.0037	0.30	0.88
Unico	0.2000*	PF 1	0.0011	0.00	0.0120	0.01	0.0169	0.000629	0.31	0.0036	0.30	0.91
Unico	0	PF 1	0.0011	0.00	0.0108	0.01	0.0169	0.000877	0.35	0.0032	0.30	1.06

Figura 27 Resultados del modelo para  $n= 0.004$  indicando la sección que coincide con la medición del limnómetro en el laboratorio indicando la elevación del agua (WS Elev.).

En la Figura 28 se estableció la geometría del canal con los criterios para la simulación y contraste con respecto a los datos experimentales de los ensayos propuestos en la investigación, como son, el ancho= 0.30 m, altura= 0.40m y el material con un Manning de  $n=0.004$ .

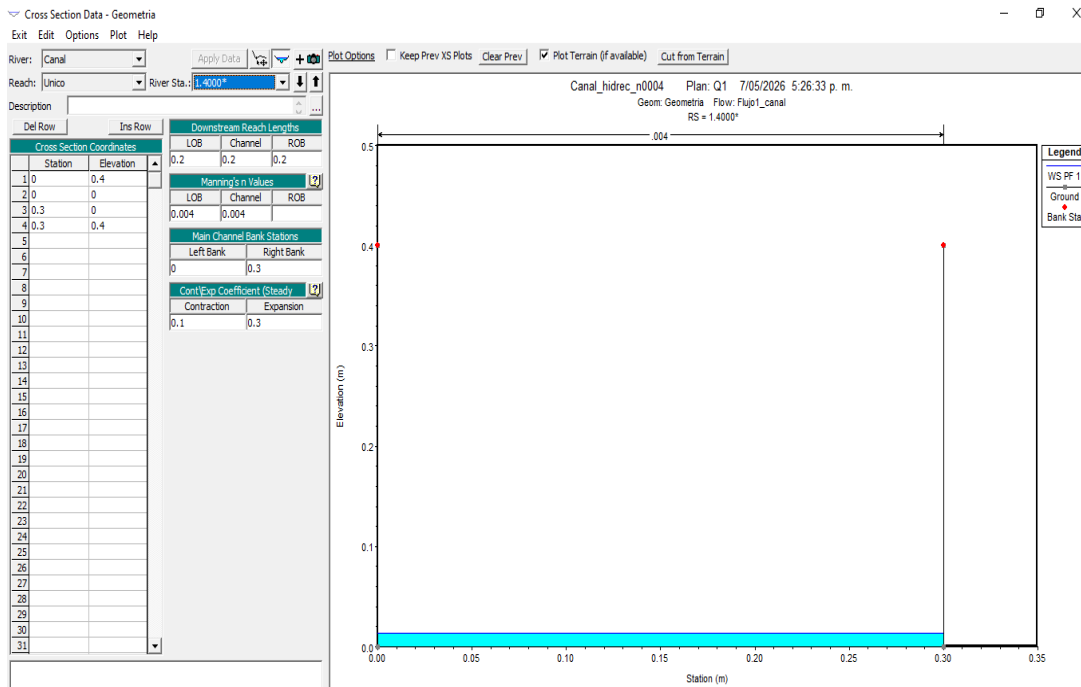


Figura 28 Geometría en la sección 1.400 con  $n= 0.004$  donde está el limnómetro usado para medir el nivel experimental en el canal.

Para realizar el contraste con respecto a los caudales del flujo experimental del canal hidráulico de la Corporación Remington, se ingresaron en HEC-RAS los 6 perfiles o caudales en la calculados anteriormente para generar los cálculos de la modelación como se muestra en la Figura 29.

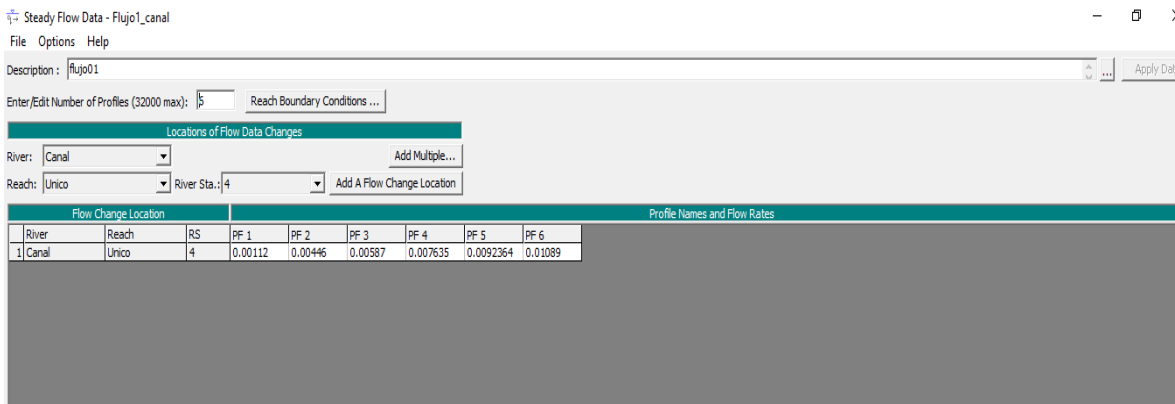


Figura 29 Definición de los caudales utilizados en HEC-RAS estado estacionario.

Se realizó el ingreso de los Manning en cada uno de los perfiles o caudales con el objetivo de generar el resultado de los cálculos requeridos para la posterior contratación teórico-experimental como se puede evidenciar en la Figura 30.

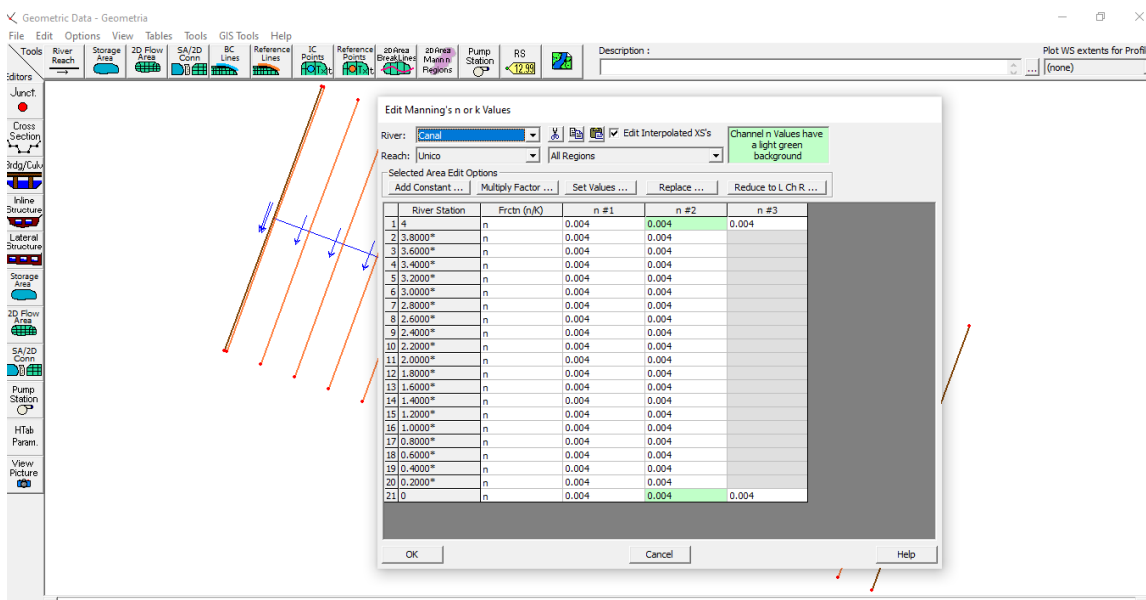


Figura 30 Establecer el Manning para cada perfil en la todas las secciones

Tabla 11 Números de Manning ingresados en HEC - RAS.

<b>Material del canal Manning</b>	
n <sub>1</sub>	0.004
n <sub>2</sub>	0.007
n <sub>3</sub>	0.01
n <sub>4</sub>	0.013
n <sub>5</sub>	0.015

### 6.3 CONTRASTE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL EN EL CANAL

De acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones realizadas de manera experimental y en el modelo HEC-RAS, se pudo comprobar el comportamiento del flujo en comparación de ambos esquemas analizados, denotando el régimen subcrítico (Tabla 12), en ambos modelos, el Fr no supera el 1, los modelos no tienen diferencias altas con respecto a las variables medidas, en los Manning analizados e ingresados a los modelos con perfiles o caudales diferentes se pudo evidenciar que el material liso presenta menos rugosidad a la hora de generar fricciones en el desplazamiento del fluido, siendo el  $n = 0.004$  el que más se acerca a el resultado esperado óptimo de acuerdo a su comportamiento en el cálculo.

Tabla 12 Datos para cálculo del régimen.

Ensayo	Q (m <sup>3</sup> /s)	yc [m]	yexp [m]	Es Subcrítico
1	0,0011200	0,0112	0,0130	Sí $y_{exp} > y_c$
2	0,0044600	0,0282	0,0300	Sí $y_{exp} > y_c$
3	0,0058700	0,0339	0,0370	Sí $y_{exp} > y_c$
4	0,0076350	0,0404	0,0440	Sí $y_{exp} > y_c$
5	0,0092364	0,0459	0,0480	Sí $y_{exp} > y_c$
6	0,0108900	0,0512	0,0540	Sí $y_{exp} > y_c$

En todos los casos, Profundidad observada  $y_{exp}$  es mayor a la Profundidad crítica  $y_c$ , lo que confirma nuevamente que el flujo es subcrítico.

En un canal horizontal, la superficie del agua siempre cae en dirección al flujo. La profundidad disminuye conforme el agua avanza hacia la descarga.

Se define el régimen mediante el número de Froude ( $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}}$  Ec. 1)

Donde (D = y) para canales rectangulares.

Tabla 13 Cálculo de Fr

Ensayo	Velocidad (v)	y	Cálculo (Fr=V/√(g·y) )	Número de Froude (Fr)	Estado
1	0,2872	0,013	(0,2872 / 0,3571)	0,804	Subcrítico
2	0,4956	0,030	(0,4956 / 0,5425)	0,913	Subcrítico
3	0,5288	0,037	(0,5288 / 0,6025)	0,878	Subcrítico
4	0,5784	0,044	(0,5784 / 0,6570)	0,880	Subcrítico
5	0,6414	0,048	(0,6414 / 0,6862)	0,935	Subcrítico
6	0,6722	0,054	(0,6722 / 0,7278)	0,924	Subcrítico

Durante la simulación se evaluaron los siguientes coeficientes de Manning (Tabla 14):

Tabla 14 Contraste de resultados Experimento teórica vs HEC- RAS

Ensayo	Tirante Experimental (m)	HEC-RAS n = 0.004 (m)	HEC-RAS n = 0.007 (m)	HEC-RAS n = 0.010 (m)	HEC-RAS n = 0.013 (m)	HEC-RAS n = 0.015 (m)
1	0.013	0.0132	0.0132	0.0153	0.0171	0.0187
2	0.03	0.0299	0.0299	0.0337	0.0369	0.0397
3	0.037	0.039	0.039	0.0411	0.0442	0.0468
4	0.044	0.0421	0.0421	0.0479	0.0513	0.0544
5	0.048	0.0477	0.0477	0.0539	0.0577	0.0613
6	0.054	0.0536	0.0536	0.0597	0.0638	0.0678

Los resultados muestran que, a medida que el coeficiente de rugosidad aumenta, también incrementa la profundidad simulada debido al aumento de las pérdidas por fricción dentro del canal. Con respecto a la relación entre Material y Rugosidad se tiene en cuenta que:

- **Naturaleza del material:** El acrílico es un material de superficie lisa, cuyo coeficiente de Manning teórico suele oscilar entre 0,009 y 0,010.
- **Valores ensayados:** Se mencionan valores como 0,004, 0,007, 0,010, 0,013 y 0,015. Los valores extremadamente bajos (0,004 o 0,007) representarían una superficie casi sin fricción, lo cual es difícil de alcanzar incluso en condiciones de laboratorio controladas.

En el impacto en la Velocidad del Flujo se evidenció que:

- **Inversamente proporcional:** El coeficiente de Manning es inversamente proporcional a la velocidad ( $V \propto 1/n$ ).
- **Eficiencia real:** Las velocidades experimentales más altas confirman que el canal de acrílico real es mucho más eficiente ("más liso") de lo que el modelo numérico asume inicialmente.

### **Contrastes de los Manning utilizados con respecto a las pérdidas de energía**

El valor de rugosidad  $n = 0.004$  presentó el mejor ajuste entre los datos experimentales y los resultados numéricos obtenidos en HEC-RAS. Las diferencias observadas fueron pequeñas y cercanas al comportamiento real del flujo dentro del canal. Esto indica que el canal presenta baja rugosidad hidráulica y un comportamiento similar al de superficies lisas. Con valores bajos de rugosidad, como  $n = 0.004$  (Figura 31), el modelo subestimó parcialmente algunos tirantes, indicando pérdidas de energía menores a las reales.

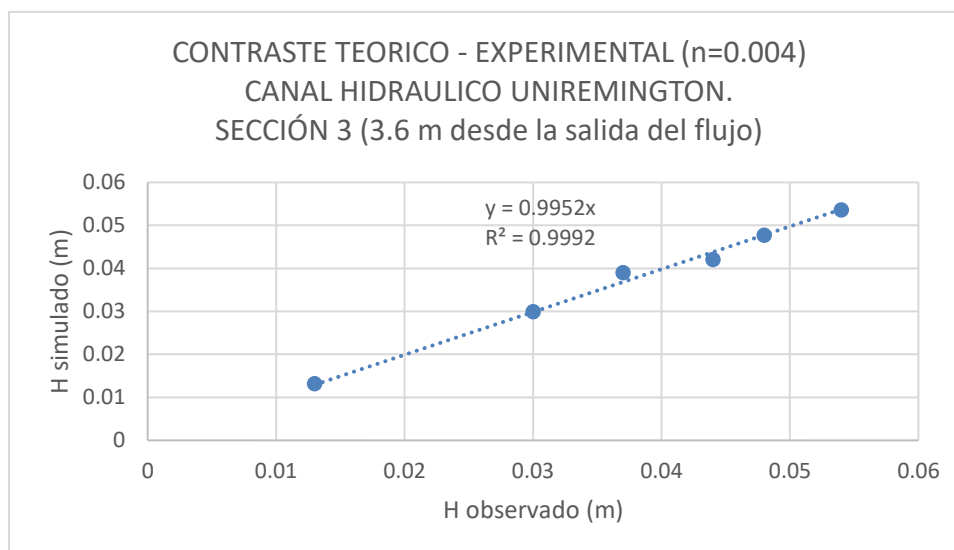


Figura 31 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando n=0.004

Tabla 15 Interpretación contraste coeficiente n= 0.004.

Ensayo	H Experimental (m)	H Simulado (m)	Diferencia Absoluta (m)
1	0.013	0.0132	0.0002
2	0.03	0.0299	0.0001
3	0.037	0.039	0.002
4	0.044	0.0421	0.0019
5	0.048	0.0477	0.0003
6	0.054	0.0536	0.0004

El valor de rugosidad  $n = 0.007$  (Figura 32) presentó un ajuste adecuado cercano al esperado entre los datos experimentales y los resultados numéricos obtenidos en HEC-RAS. Las diferencias observadas fueron pequeñas y cercanas al comportamiento real del flujo dentro del canal. Esto indica que el canal presenta baja rugosidad hidráulica y un comportamiento similar al de superficies lisas con valores bajos de Rugosidad.

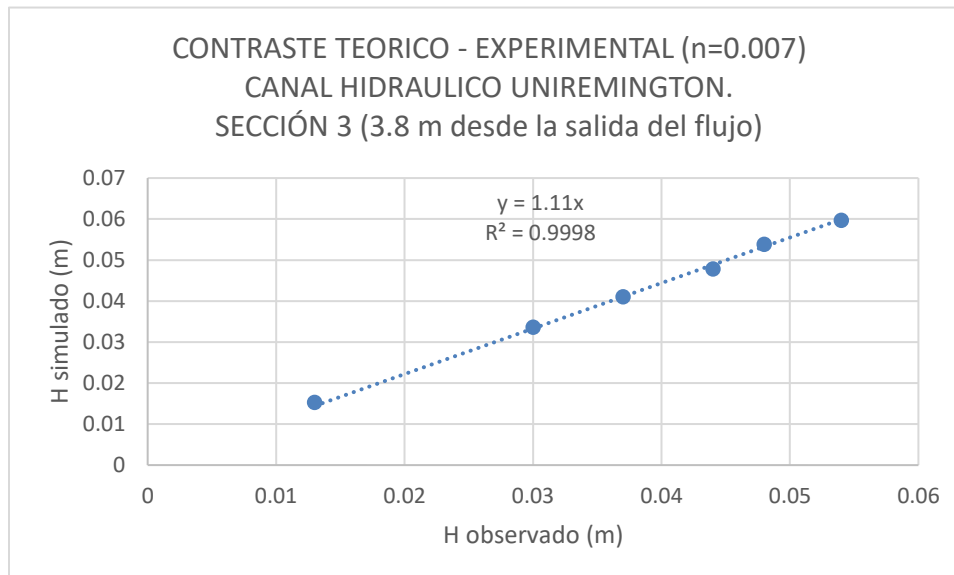


Figura 32 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando  $n=0.007$

En la eficiencia de la ecuación de energía se demostró que la profundidad ( $y_{exp.}$ ) observado es consistentemente mayor al ( $y_c$ ) profundidad crítica. Para el caudal máximo (0,0108900  $m^3/s$ ) la pérdida por fricción teórica calculada fue de 1.1921, lo cual es coherente con la baja rugosidad del acrílico ( $n= 0.01$  mm/m) (Figura 33) y explica la estabilidad del flujo a pesar de la falta de inclinación.

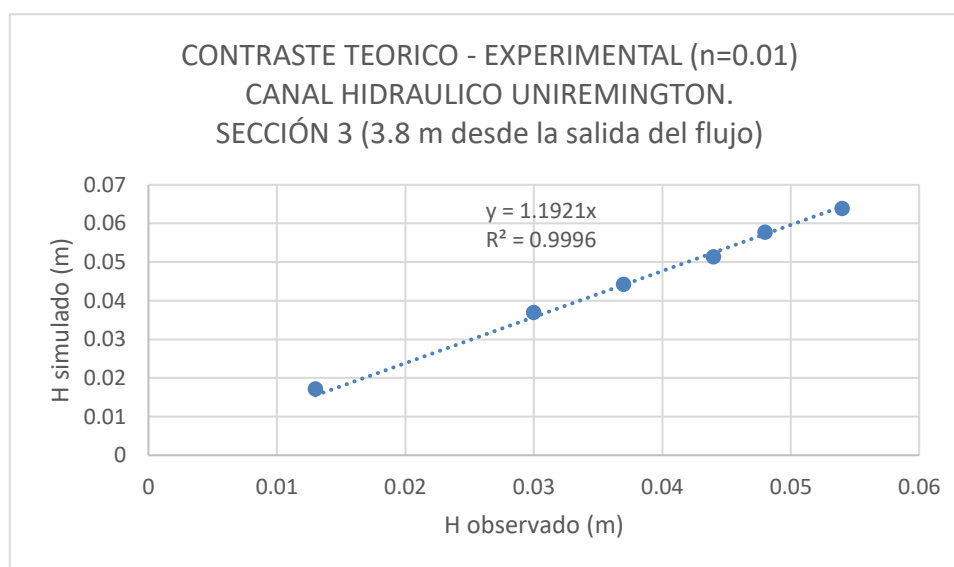


Figura 33 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando  $n=0.010$

Para los valores ( $n = 0.013$ ) y ( $n = 0.015$ ) (Figura 34 y Figura 35), el modelo presentó una sobreestimación de las profundidades hidráulicas. Esto ocurre debido a que el software (HEC - RAS) interpreta mayores pérdidas de energía por fricción, disminuyendo la velocidad del flujo y aumentando la profundidad necesaria para transportar el mismo caudal.

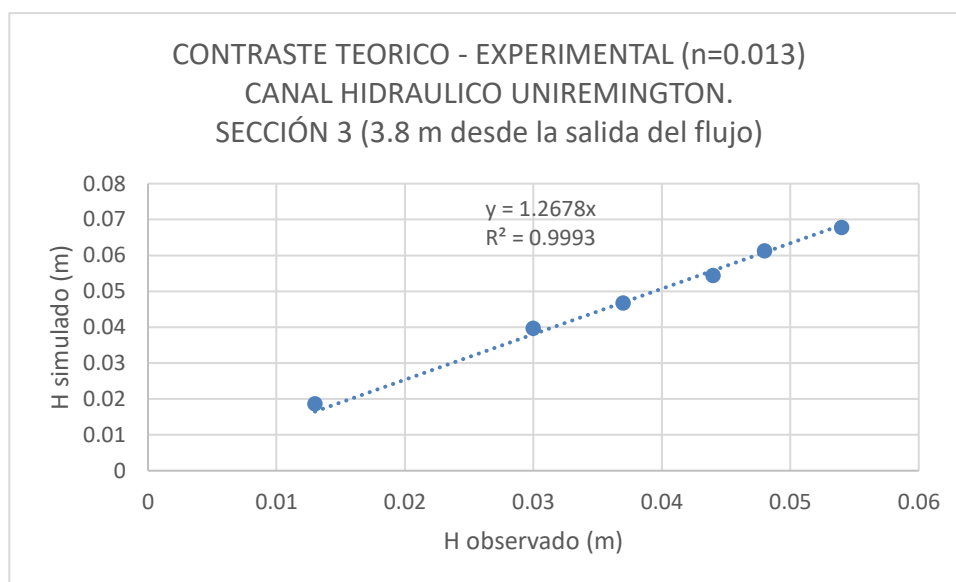


Figura 34 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando  $n=0.013$ .

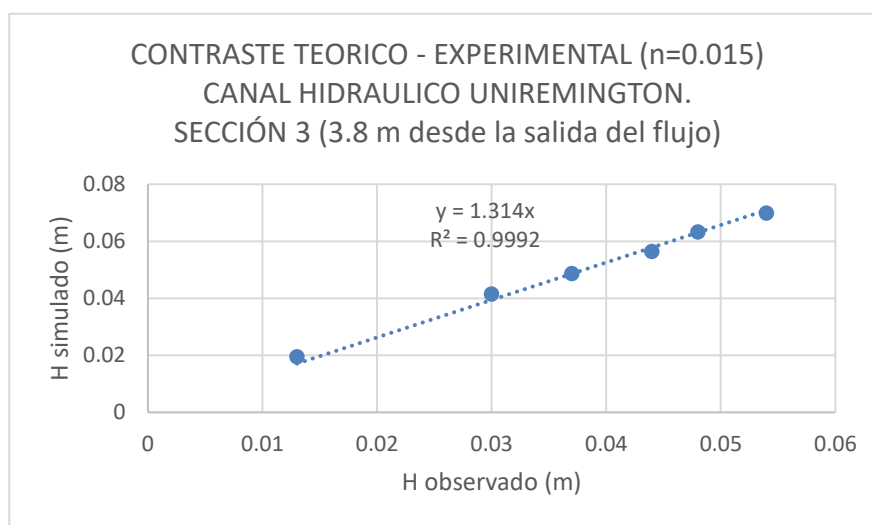


Figura 35 Niveles medidos respecto a niveles simulados en HEC-RAS usando  $n=0.015$

## 7 CONCLUSIONES

- En todos los casos experimentales, el número de Froude resultó menor a 1 y la profundidad observada fue superior al crítico ( $y_{\text{exp}} > y_c$ ). Esto confirma que el canal opera consistentemente en régimen subcrítico, validando la estabilidad del flujo para las mediciones.
- Se confirma la premisa teórica: en un canal horizontal ( $S_0 = 0$ ), el movimiento del agua depende exclusivamente de la degradación de la energía potencial (caída del tirante). La reducción de aproximadamente 3 mm por cada metro es coherente con la fricción interna del fluido.
- Los valores de  $n$  bajos (0,004 - 0,007) son probablemente teóricos o de calibración extrema, mientras que los valores superiores a 0,012 representan una condición de rugosidad que no corresponde al acrílico limpio.
- La interpretación de los resultados sugiere que el valor real que mejor describe el comportamiento del canal de laboratorio debería estar cercano a 0,009, lo que permitiría que las velocidades simuladas aumenten y los errores relativos disminuyan hacia un rango aceptable.
- Dado que el canal es horizontal, el tirante de agua en las secciones medidas está determinado por el control aguas abajo. El hecho de que el flujo sea subcrítico sugiere que el nivel a la salida del canal está influyendo en todo el tramo experimental, generando un efecto de remanso que eleva la profundidad por encima de la profundidad crítica.

- El análisis mediante el número de Froude confirmó que  $Fr < 1$  para todos los ensayos realizados.
- Los resultados demuestran que el flujo fue predominantemente subcrítico, caracterizado por velocidades moderadas y predominio de la energía potencial sobre la energía cinética.
- Se observó experimentalmente que:
  - I. A mayor caudal, mayor profundidad hidráulica.
  - II. A mayor profundidad, aumenta la energía específica.
  - III. La velocidad del flujo incrementa progresivamente con el caudal.
- La simulación y los cálculos experimentales mostraron pérdidas de energía pequeñas pero constantes a lo largo del canal. Esto evidencia que hay:
  - I. Presencia de fricción hidráulica.
  - II. Influencia directa de la rugosidad.
  - III. Disminución gradual de la energía específica.
- En el ensayo correspondiente al caudal:  $Q_3 = 0.00587 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se verificó una reducción aproximada de 3 mm/m en la lámina de agua, comportamiento coherente con la teoría de flujo gradualmente variado en canales horizontales.
- El canal experimental presentó un comportamiento hidráulico estable y coherente con la teoría de flujo en canales abiertos, permitiendo validar experimentalmente conceptos de profundidad, energía específica, pérdidas por fricción y régimen subcrítico.
- El contraste entre los resultados experimentales y las simulaciones realizadas en HEC-RAS evidenció que el coeficiente de Manning más representativo para el

canal fue aproximadamente:  $n = 0.004$ , ya que presentó la menor diferencia entre las profundidades simuladas y observadas.

- Se comprobó que el incremento del coeficiente de rugosidad produce mayores pérdidas de energía y mayores profundidades hidráulicas, debido al aumento de la resistencia al flujo.
- La modelación numérica permitió representar adecuadamente el comportamiento hidráulico del canal, demostrando que HEC-RAS constituye una herramienta confiable para el análisis de flujo gradualmente variado en canales prismáticos.

## 8 ANEXOS

### 8.1 OBSERVACIONES

- Durante los ensayos se evidenció que pequeñas variaciones en el caudal generan cambios significativos en la profundidad hidráulica, especialmente para profundidades bajas.
  
- El flujo presentó estabilidad a lo largo del canal, sin evidencias importantes de turbulencia o resalto hidráulico.
  
- Las diferencias entre resultados experimentales y simulados pueden asociarse a:
  - I. Errores de lectura de la profundidad del flujo.
  - II. Variaciones reales de rugosidad.
  - III. Vibraciones o perturbaciones del flujo.
  - IV. Precisión limitada de los instrumentos de medición.
  
- Aunque el canal se consideró horizontal, experimentalmente se observó una ligera disminución del nivel del agua en el sentido del flujo debido a las pérdidas por fricción.

## 8.2 RECOMENDACIONES

- Realizar futuras mediciones utilizando sensores digitales de nivel para disminuir errores asociados a la lectura manual de la profundidad.
- Implementar un mayor número de secciones de control hidráulico para obtener perfiles de flujo más detallados y mejorar la calibración del modelo numérico.
- Evaluar el comportamiento hidráulico del canal bajo pendientes mayores para analizar transiciones entre régimen subcrítico y supercrítico.
- Realizar simulaciones adicionales considerando flujo no permanente y diferentes materiales de recubrimiento para comparar el efecto de la rugosidad hidráulica.
- Calibrar experimentalmente el coeficiente de Manning para cada condición hidráulica específica, ya que este parámetro puede variar dependiendo del caudal y de las condiciones reales del flujo.

### 8.3 CALCULOS ESPECIFICOS RELACIONADOS CON LA BOMBA DEL CANAL

El motor  $\approx 1$  HP (0.75 kW) y el modelo de motobomba aproximado (IHM 40A-5TW), cuyo caudal nominal suele estar en el rango que mencioné antes  $\approx 160$ – $180$  L/min. A partir de ahí se puede estimar la altura (H) usando la potencia disponible y suponer eficiencias razonables. A continuación, se presentan los supuestos, las fórmulas y los resultados numéricos paso a paso del.

#### Supuestos

- Potencia eléctrica del motor:  $P_{el} = 0,75$  kW (1 HP nominal).
- Rendimiento del motor (supuesto):  $\eta_m = 0,85 \rightarrow$  potencia útil en eje:  
 $P_{eje} = P_{el} \cdot \eta_m$ .
- Rendimiento de la bomba (dos escenarios):  $\eta_p = 0,50$ (50 %) y  $\eta_p = 0,65$ (65 %).
- Densidad del agua  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>. Grav.  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>.
- Caudales tomados desde catálogo estimado:  $Q = 160$  L/min y  $Q = 180$  L/min.

#### Conversión de caudal

- $160$  L/min =  $160/1000$  m<sup>3</sup>/min =  $0,16$  m<sup>3</sup>/min =  $0,16/60 = 0,0026666667$  m<sup>3</sup>/s.
- $180$  L/min =  $0,003$  m<sup>3</sup>/s.

#### Potencia en el eje

$$P_{eje} = 0,75 \text{ kW} \times 0,85 = 0,6375 \text{ kW.}$$

Potencia hidráulica disponible (para cada  $\eta_p$ ):

$$P_{hid} = P_{eje} \cdot \eta_p.$$

#### Fórmula para la altura (H)

La potencia hidráulica es  $P_{hid} = \rho g Q H$ . Entonces:

$$H = \frac{P_{hid}}{\rho g Q} = \frac{P_{eje} \eta_p}{\rho g Q}.$$

### Cálculos numéricos

1. Para  $Q = 160 \text{ L/min} = 0,0026666667 \text{ m}^3/\text{s}$

- Si  $\eta_p = 0,50$ :
  - $P_{hid} = 0,6375 \cdot 0,50 = 0,31875 \text{ kW} = 318,75 \text{ W}$ .
  - $H = \frac{318,75}{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,0026666667} = 12,18 \text{ m} (\approx 12,2 \text{ m})$ .
- Si  $\eta_p = 0,65$ :
  - $P_{hid} = 0,6375 \cdot 0,65 = 0,414375 \text{ kW} = 414,375 \text{ W}$ .
  - $H = \frac{414,375}{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,0026666667} = 15,84 \text{ m} (\approx 15,8 \text{ m})$ .

2. Para  $Q = 180 \text{ L/min} = 0,003 \text{ m}^3/\text{s}$

- Si  $\eta_p = 0,50$ :
  - $P_{hid} = 318,75 \text{ W}$ .
  - $H = \frac{318,75}{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,003} = 10,83 \text{ m} (\approx 10,8 \text{ m})$ .
- Si  $\eta_p = 0,65$ :
  - $P_{hid} = 414,375 \text{ W}$ .
  - $H = \frac{414,375}{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,003} = 14,08 \text{ m} (\approx 14,1 \text{ m})$ .

En síntesis:

- **Caudal nominal** (según catálogo IHM 40A-5TW):  $\approx 160 - 180 \text{ L/min}$ .
- **Altura estimada** para ese rango de caudales, con supuestos razonables de eficiencia:
  - $\approx 10,8 \text{ m} - 15,8 \text{ m}$  (dependiendo del caudal real y eficiencia de la bomba).

## 9 REFERENCIAS

- Brunner, G. W. (2022). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual* (Version 6.4). USACE.
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open-Channel Flow* (2nd ed.). Springer.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company.
- Cunge, J. A., Holly, F. M., & Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman.
- Díaz, C. (2001). *Comparación teórico experimental de perfiles de flujo* (Tesis de pregrado, Escuela de Ingeniería de Antioquia). Facultad de Ingeniería Civil, Área de Mecánica de Fluidos y Recursos Hidráulicos.
- French, R. H. (1985). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- García, M. H. (Ed.). (2008). *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110.
- American Society of Civil Engineers.
- Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan.
- Henderson, F. M., & Wooding, R. A. (1966). Overland flow and the numerical solution of the Saint-Venant equations. *Journal of Hydrology*, 2(1), 49–68. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(64\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(64)90019-6)
- Houghtalen, R. J., Hwang, N. H. C., & Akan, A. O. (2016). *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems* (5th ed.). Pearson.
- Malaver Nieto, E. D. (2023). *Desarrollo de simulaciones de modelos hidráulicos como herramienta de soporte de la enseñanza del laboratorio de hidráulica* (Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander). Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Bucaramanga.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith,

- T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (1998). *Fluid mechanics* (9th ed.). McGraw-Hill.
- United States Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic reference manual* (Version 5.0). Hydrologic Engineering Center.
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2023). *HEC-RAS hydraulic reference manual* (Version 6.5). <https://www.hec.usace.army.mil>
- Villena, H., & Alexandra, J. S. (2020). Eficiencia en el cálculo de parámetros hidráulicos usando el canal pendiente variable y el software HEC–RAS. Universidad Privada del Norte, Cajamarca.