



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Civil

*Análisis de la influencia del coeficiente de rugosidad de Manning en los
parámetros hidráulicos para dos ríos de montaña de la provincia del
Azuay.*

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero
Civil**

Autores: CARLOS ANDRÉS IZQUIERDO TORRES
EDISSON XAVIER SUQUILANDA FAJARDO

DIRECTOR: ING. PATRICIA ALEJANDRA PALACIOS ROMERO,
MSC.

**Cuenca, Ecuador
2026**

DEDICATORIA

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño a Dios y a mi Madre Dolorosa del colegio, quienes me han bendecido en esta trayectoria de mi vida con una gran familia y amigos quienes me han apoyado y siempre me han motivado a lo largo de este periodo de 4 años de carrera, pero especialmente quiero dedicarle a mi madre y padre, quienes siempre han estado conmigo durante todo este trayecto, animándome y motivándome a seguir siempre adelante en los momentos más difíciles de la misma dándome su aliento y fuerza a que siga adelante y no me dé por vencido.

Carlos Andrés Izquierdo Torres.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis, en primer lugar, a mis padres que son el pilar de mi vida y siempre me han guiado a ser una persona de la cual puedan estar orgullosos. Gracias por su amor incondicional, por su gran esfuerzo y por brindarme el apoyo necesario para alcanzar cada una de mis metas. Este logro también es suyo.

A mi familia por su motivación en el transcurso de la carrera por nunca soltarme la mano y por darme seguridad y fortaleza en los momentos más difíciles.

A mis amigos, por su compañía apoyo y por compartir conmigo tantos momentos durante este proceso. Gracias por brindarme su amistad y por hacer que este camino haya sido más efímero.

Edisson Xavier Suquilanda Fajardo.

AGRADECIMIENTO

Primero que todo queremos agradecer a Dios por habernos guiado e iluminado en esta trayectoria largo que ha sido complicado que estamos a punto de culminarlo.

A nuestra docente tutora Ing. Patricia Alejandra Palacios Romero, M.Sc., quien nos brindó todo su apoyo que nos pudo brindar durante el desarrollo de nuestro trabajo de titulación con su conocimiento y experiencia adquiridas a lo largo de su vida profesional y trabajo.

A nuestras familias y amigos quienes siempre estuvieron a nuestro lado apoyándonos y motivándonos en los días y momentos más complicados de nuestra carrera para que nunca nos diéramos por vencidos.

A la Universidad del Azuay y sobre todo a los docentes de Ingeniería Civil quienes nos transmitieron sus conocimientos y experiencias adquiridas con el objetivo de proporcionarnos enseñanza de calidad para formarnos como unos nuevos y buenos profesionales de elite a futuro.

Muchas gracias a todos.

Índice de contenidos

Índice de contenidos	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	vii
Introducción.....	1
Antecedentes.....	1
Problemática y justificación	6
Objetivos.....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos	7
Capítulo 1: Recopilación y sistematización de datos	9
1.1. Levantamiento Topográfico y Batimétrico	9
1.1.1. Alcance general.....	9
1.1.2. Topografía del río Collay	10
1.1.3. Batimetría del río Collay	11
1.1.4. Topografía río Zhío	11
1.1.5. Batimetría del río Zhío	12
1.2. Levantamiento Geotécnico	13
1.2.1. Geotecnia en el río Collay	13
1.2.2. Geotecnia en el río Zhío	15
1.3. Integración comparativa de los levantamientos en ambos ríos.....	17
1.4 Estudio Hidrológico	17
Capítulo 2: Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning	20
2.1. Coeficiente de rugosidad de Manning	20
2.2. Formulaciones para la determinación del coeficiente de Manning.....	21
2.2.1. Formulaciones basadas en la granulometría del lecho	21
2.2.2. Formulaciones basadas en parámetros hidráulicos	25
2.3. Revisión de literatura sobre ríos de montaña.....	32
2.4. Aplicación del coeficiente de Manning en el estudio	34
Capítulo 3: Modelación hidráulica de los ríos de montaña	39
3.1. Tipos de modelos en la modelación hidráulica	40
3.2.1. Simulación estática.....	40
3.2.2. Simulación de modelos numéricos de flujo no uniforme y no estacionario.....	40
3.2.3. Modelos no estacionarios	40

3.2.4. Modelos 1D, 2D y 3D	41
3.3. Tipos de flujo a modelar.....	41
3.3.1. Flujo uniforme.....	42
3.3.2. Flujo Variado.....	42
3.3.3. Flujo mixto	42
3.4. Softwares para modelación hidráulica	42
3.4.1. HEC-RAS.....	43
3.5 Construcción del modelo hidráulico.....	43
3.5.1. Tipo de modelo hidráulico	44
3.5.2. Geometría del modelo	44
3.5.3. Caudales de simulación.....	45
3.5.4. Condiciones de frontera	46
3.6. Información base para modelación hidráulica.....	48
3.7. Construcción del modelo hidráulico.....	49
3.8. Comparación de resultados	50
3.8.1. Resultados gráficos	52
3.9. Análisis de sensibilidad por variable.....	56
3.9.1. Collay	57
3.9.2. Zhío	59
3.10. Análisis de los perfiles longitudinales.....	63
3.10.1. Río Collay	63
3.10.2. Río Zhío	65
3.11. Índice de sensibilidad.....	69
3.12. Variación total (%).....	71
CONCLUSIONES.....	74
RECOMENDACIONES	77
Referencias	78

Índice de figuras

Figura 1-1: Levantamiento topográfico del Río Collay	10
Figura 1-2: Ejemplo sección transversal de batimetrías, Río Collay.....	11
Figura 1-3: Levantamiento topográfico del río Zhío.....	12
Figura 1-4: Ejemplo sección transversal de batimetrías, río Zhío	13
Figura 1-5: Ubicación de las perforaciones realizadas, río Collay	14
Figura 1-6: Ubicación de las perforaciones realizadas, Río Zhío	15
Figura 3-1: Modelo hidráulico del río Collay	50
Figura 3-2: Modelo hidráulico del río Zhío	50
Figura 3-3: Resultados de la modelación hidráulica para el río Collay	53
Figura 3-4: Resultados de la modelación hidráulica para el río Zhío	55
Figura 3-5: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Collay de la velocidad promedio y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años.....	57
Figura 3-6: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Collay de la lámina de agua promedio y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años	58
Figura 3-7: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Collay de la energía total promedio y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años.....	59
Figura 3-8: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Zhío de la velocidad promedio y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años.....	60
Figura 3-9: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Zhío de la lámina de agua y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años	61
Figura 3-10: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Zhío de la energía total y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años	62
Figura 3-11: Gráfica de la envolvente del río Collay de la velocidad y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años.....	63
Figura 3-12: Gráfica de la envolvente del río Collay de la lámina de agua y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años.....	64
Figura 3-13: Gráfica de la envolvente del río Collay de la energía total y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años.....	65
Figura 3-14: Gráfica de la envolvente del río Zhío de la velocidad y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años.....	66
Figura 3-15: Gráfica de la envolvente del río Zhío de la lámina de agua y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años.....	67
Figura 3-16: Gráfica de la envolvente del río Zhío de la energía total y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años.....	68

Índice de tablas

Tabla 1-1. Comparación de parámetros geotécnicos y geomorfológicos entre los ríos Collay y Zhío.....	17
Tabla 1-2. Resumen del estudio Hidrológico del Río Zhío.....	18
Tabla 1-3. Resumen del estudio Hidrológico del Río Collay.....	19
Tabla 2-1. Valores usados del coeficiente de Manning para cauces naturales	30
Tabla 2-2. Valores a seleccionar a través del Método de Cowan	32
Tabla 2-3. Valores a seleccionar a través del Método de Cowan	35
Tabla 2-4. Interpolación de los percentiles d_{90} , d_{84} y d_{50}	35
Tabla 2-5. Interpolación de los percentiles d_{90} , d_{84} y d_{50}	35
Tabla 2-6. Resumen de los valores de “n” de los autores basados en formulación granulométrica	36
Tabla 2-7. Resumen de los valores de “n” de los autores basados en formulación de parámetros hidráulicos	37
Tabla 2-8. Resumen de los valores de “n” de los autores basados en tablas	38
Tabla 3-1. Parámetros hidráulicos usados para la definición del río Collay.....	47
Tabla 3-2. Parámetros hidráulicos usados para la definición del río Zhío	48
Tabla 3-3. Resumen de los valores de “n” de todos los autores basados en literatura, formulación granulométrica, parámetros hidráulicos y tablas respectivamente.....	49
Tabla 3-4. Comparación de los parámetros hidráulicos con los números de Manning “n” de todos los autores del río Collay	50
Tabla 3-5. Comparación de los parámetros hidráulicos con los números de Manning “n” de todos los autores del río Zhío.....	51
Tabla 3-6. Índice de sensibilidad del río Collay	69
Tabla 3-7. Índice de sensibilidad del río Zhío	70
Tabla 3-8. Variación total del río Collay	71
Tabla 3-9. Variación total del río Zhío	72
Tabla 3-10. Resumen del índice de sensibilidad más la variación total del río Collay	72
Tabla 3-11. Resumen del índice de sensibilidad más la variación total del río Zhío.....	73

Análisis de la influencia del coeficiente de rugosidad de Manning en los parámetros hidráulicos para dos ríos de montaña de la provincia del Azuay.

RESUMEN:

La presente investigación analiza la influencia del coeficiente de rugosidad de Manning, “n” en los parámetros hidráulicos de dos ríos de montaña de la provincia del Azuay, con la finalidad de comparar el efecto de distintos valores de “n” en el comportamiento del flujo. Para ello, se aplicaron 10 métodos diferentes para la estimación del coeficiente de Manning, basados en formulaciones granulométricas, parámetros hidráulicos y literatura especializada. Con estos datos se desarrolló la modelación hidráulica mediante el software HEC-RAS para periodos de retorno de 25 y 50 años, evaluando la variación de la velocidad, lámina de agua y energía de flujo. Los resultados evidencian que el incremento del coeficiente de Manning produce una disminución en la velocidad del flujo, además de un aumento en la profundidad del agua y en las pérdidas de energía. La rugosidad del cauce influye en los parámetros hidráulicos, siendo su correcta caracterización fundamental para garantizar resultados confiables en el análisis de ríos de montaña.

Palabras clave: Coeficiente de Manning, Modelación hidráulica, Ríos de montaña, Parámetros hidráulicos, Rugosidad del cauce.

ABSTRACT:

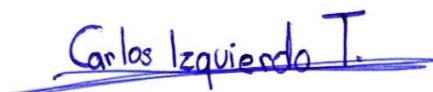
This research analyzes the influence of Manning’s roughness coefficient, “n”, on the hydraulic parameters of two mountain rivers in the Azuay province, with the aim of comparing the effect of different “n” values on flow behavior. To this end, ten different methods were applied to estimate Manning’s coefficient, based on granulometric formulations, hydraulic parameters, and specialized literature. Using these data, hydraulic modeling was carried out with HEC-RAS software for return periods of 25 and 50 years, evaluating variations in flow velocity, water depth, and flow energy. The results show that an increase in Manning’s coefficient leads to a decrease in flow velocity, as well as an increase in water depth and energy losses. Channel roughness influences hydraulic parameters, and its proper characterization is essential to ensure reliable results in the analysis of mountain rivers.

Keywords: Manning’s coefficient, hydraulic modeling, mountain rivers, hydraulic parameters, channel roughness.



Edisson Xavier Suquilanda

Autor



Carlos Izquierdo Torres

Autor

Introducción

Antecedentes

Durante las últimas décadas del siglo XX y los primeros años del siglo XXI se desarrolló un conjunto amplio de investigaciones orientadas a comprender la relación entre la rugosidad hidráulica y las propiedades geomorfológicas del cauce, principalmente el tamaño del sedimento, la estructura del lecho y la pendiente longitudinal. Estos trabajos permitieron establecer que los ríos de montaña, dominados por gravas, rocas de tamaño medio y grandes bloques, presentan una morfología altamente heterogénea. Esta variabilidad genera un patrón de resistencia al flujo complejo y difícil de representar mediante ecuaciones hidráulicas convencionales (Buffington & Montgomery, 1997). Estudios pioneros, como el de Hey (1997), evidenciaron que dicha heterogeneidad geomorfológica influye directamente en la magnitud de la resistencia al flujo, lo cual limita el uso de relaciones tradicionales entre rugosidad y geometría del cauce.

En este periodo, diversos autores como Rickenman (1990) y Grant (1997), propusieron formulaciones hidráulicas específicas para ríos de montaña caracterizados por pendientes pronunciadas y flujos altamente energéticos. En estos ambientes, la ecuación clásica de Manning mostró limitaciones importantes, principalmente por subestimar la resistencia generada por sedimentos gruesos y estructuras naturales del lecho. Jarrett (1984) fue uno de los primeros en señalar este comportamiento, el cual fue confirmado por estudios posteriores entre las décadas de 1990 y 2000. Estas investigaciones destacaron la necesidad de ajustar las ecuaciones de resistencia para representar de forma más adecuada la disipación de energía en cauces rugosos y turbulentos. Como respuesta, se desarrollaron modelos empíricos alternativos y ajustes a las ecuaciones existentes, permitiendo obtener estimaciones más confiables de variables críticas como la velocidad

media, el tirante de agua y los esfuerzos cortantes en tramos con comportamiento hidráulico irregular.

Durante la década de 2010, los estudios se enfocaron en analizar con mayor detalle cómo las características físicas del lecho, especialmente la granulometría y la morfología del canal, influyen en la rugosidad hidráulica efectiva. Este enfoque resultó especialmente relevante en ríos donde predominan gravas, piedras de tamaño medio y bloques de gran tamaño. La evidencia generada por Yen (2010) y Rickenmann & Recking (2011), mostraron que el coeficiente de Manning, n , tiende a aumentar conforme crecen tanto el tamaño de los sedimentos como la complejidad geométrica del cauce. Los elementos de gran magnitud incrementan la resistencia al flujo, intensifican la turbulencia y modifican la distribución interna de velocidades; por ello, los valores de rugosidad en ríos de alta pendiente suelen ser mucho mayores que los estimados mediante métodos tradicionales basados en materiales finos. Entre los autores que abordaron este comportamiento, Ferguson (2010) destacó la necesidad de incorporar explícitamente la variabilidad granulométrica y morfológica en la estimación de la resistencia al flujo.

El avance de los modelos hidráulicos permitió integrar factores físicos adicionales que influyen directamente en la rugosidad. A diferencia de los métodos tradicionales, basados únicamente en parámetros geométricos como el radio hidráulico o la pendiente, los enfoques modernos incluyeron una caracterización más completa del sistema fluvial. Esto consideró la geometría detallada del cauce, las irregularidades del lecho, la variación longitudinal de la pendiente y la influencia de la vegetación ribereña, cuyos tallos, ramas y raíces incrementan la resistencia y generan turbulencia adicional (Manners et al., 2011). Asimismo, se incorporó el efecto de elementos presentes en el canal como troncos, barras de sedimentos y rocas de gran tamaño, que actúan como obstáculos y modifican significativamente el patrón del flujo. La integración de estos factores permitió generar

modelos más representativos, reduciendo las limitaciones de los métodos clásicos que no consideraban esta diversidad de fuentes de rugosidad (Comiti & Lenzi, 2012).

Investigaciones recientes como la de Zahedi & Noormand (2015) confirmaron que los valores del coeficiente de Manning en ríos de fuerte pendiente suelen superar considerablemente los rangos establecidos por tablas convencionales. Esta diferencia se explica por la complejidad de la rugosidad en sistemas torrenciales, donde interactúan elementos geomorfológicos de múltiples escalas bloques, gravas gruesas, formas irregulares del lecho y estructuras naturales que incrementan la resistencia hidráulica y generan patrones de flujo altamente turbulentos. Como resultado, los valores tradicionales de n no representan adecuadamente el comportamiento hidrodinámico real en estos cauces (Bathurst, 2018), lo que evidencia la necesidad de utilizar métodos más detallados y adaptados a ambientes montañosos. Además, un estudio como es de Takata et al., (2024), muestran que el coeficiente de Manning continúa siendo uno de los parámetros más influyentes para estimar el comportamiento hidráulico, especialmente en zonas montañosas con morfología altamente variable. Incluso pequeñas variaciones en n pueden modificar significativamente la velocidad del flujo, la profundidad, los esfuerzos cortantes y los niveles de agua simulados. Esto evidencia la fuerte dependencia de la rugosidad respecto de los elementos presentes en el lecho y las riberas bloques, gravas y vegetación y la necesidad de estimarlo con alta precisión para obtener resultados confiables en la modelación hidráulica de ríos de montaña.

En la década actual Adams & Zampiron (2020) se ha constatado que los ríos de montaña presentan coeficientes de rugosidad elevados y distribuciones marcadamente heterogéneas en comparación con cauces de baja pendiente. Esto se debe a la presencia de grandes bloques, escalones, saltos, gravas gruesas y vegetación ribereña que incrementan la irregularidad del flujo y la turbulencia. La combinación de estos factores

genera una alta sensibilidad de los modelos hidráulicos ante pequeñas variaciones en el coeficiente de Manning n , lo que hace indispensable estimarlo con precisión para reproducir adecuadamente la velocidad, el tirante y los esfuerzos cortantes en estos entornos (Comiti & Mao, 2021).

La modelación hidráulica constituye una herramienta esencial para comprender, predecir y gestionar el comportamiento del flujo mediante la representación matemática o computacional de los procesos hidrodinámicos (Bladé Castellet, 2005). Este enfoque es especialmente necesario en ríos de montaña, debido a su complejidad geomorfológica, dominada por gravas, bloques y formas abruptas, genera un comportamiento hidráulico difícil de caracterizar, lo que hace indispensable recurrir a modelos especializados para determinar parámetros como el tirante, la velocidad, los caudales y la rugosidad.

Por otro lado, los modelos hidráulicos avanzados, como HEC-RAS 1D y 2D, IBER y FLOW-2D, Palacios Domínguez (2021) demostró que la representación detallada de la rugosidad del cauce mediante zonificación o distribuciones estadísticas mejora significativamente la calibración y la precisión de la simulación del flujo. Al considerar la variabilidad espacial asociada a bloques, vegetación, estructuras naturales y sedimentos gruesos, estos modelos reproducen de manera más realista la distribución de velocidades, los tirantes, los esfuerzos cortantes y la generación de turbulencia. Este enfoque resulta esencial en cauces con pendientes pronunciadas y geometrías irregulares, donde los métodos tradicionales tienden a simplificar en exceso las condiciones reales y subestimar la resistencia al flujo (Sisalima, 2022).

Entre estos parámetros, el coeficiente de Manning n es uno de los más determinantes, ya que representa la resistencia ejercida por el cauce sobre el flujo. No obstante, su estimación en ríos de montaña es un reto debido a la irregularidad del lecho y la amplia variación granulométrica presente en estos entornos (Martínez Ramírez & Solano

González, 2020). Estudios como el de Fernández de Córdova Webster et al. (2020) demuestran que pequeñas variaciones en n pueden modificar significativamente los resultados de la delimitación de zonas inundables, lo que evidencia la necesidad de asignar valores adecuados y representativos de la morfología real del cauce.

La literatura científica internacional ha demostrado que la rugosidad en ríos montañosos no solo es elevada, sino también altamente heterogénea, y que su determinación precisa es indispensable para la correcta calibración de modelos hidráulicos. Jarrett (1984) señaló que los ríos de alta pendiente presentan valores de Manning mucho mayores que los sugeridos por tablas convencionales, debido a la turbulencia extrema y a la presencia de bloques de gran tamaño. Hey (1997) reafirmó esta idea al indicar que la morfología del canal y los procesos de transporte de sedimentos determinan directamente la rugosidad, y que la erosión y sedimentación modifican continuamente la estructura del cauce.

A lo largo de los años, diferentes autores han ampliado esta teoría. Ferguson (2010) cuestionó incluso la validez de la ecuación de Manning para ríos con alto nivel energético, proponiendo avanzar hacia formulaciones con mayor fundamento físico. Comiti y Lenzi (2012) sostienen que la rugosidad en ríos de alta pendiente proviene de múltiples escalas desde gravas hasta bloques y estructuras naturales y que los modelos hidráulicos deben incorporar esta complejidad para representar adecuadamente la resistencia al flujo. Bathurst (2018) mostró que incluso dentro de un mismo tramo pueden existir variaciones importantes en la rugosidad debido a cambios locales en el tamaño del sedimento o en la profundidad del flujo, lo que invalida el uso de valores uniformes de n en ríos torrenciales.

Investigaciones más recientes como la de Comiti y Mao (2021) indican que emplear un valor homogéneo de Manning en ríos de montaña produce errores significativos en la simulación de la velocidad y los esfuerzos cortantes. Por ello, recomiendan utilizar rugosidad distribuida espacialmente o basada en mapeos detallados. Esta tendencia

también ha sido confirmada por estudios de modelación 2D, así mismo en el estudio de Sisalima (2022), se demuestra que representar la rugosidad mediante zonas o distribuciones estadísticas mejora notablemente la calibración hidráulica, superando en más del 20 % la precisión de modelos con n uniforme.

La revisión histórica evidencia de manera consistente que los métodos tradicionales de estimación de rugosidad no representan adecuadamente la complejidad de los ríos de montaña. Esta evidencia científica constituye la base para la problemática específica del presente estudio. En este sentido, Takata et al. (2024) destacan que el retro cálculo del coeficiente de Manning mediante simulaciones 2D permite obtener valores más coherentes con la realidad, ya que la rugosidad depende directamente de los cambios geomorfológicos del lecho y de estructuras internas como bloques, escalones o sedimentaciones irregulares. Estos hallazgos confirman que la variabilidad espacial del cauce influye de manera directa en el valor de n y, por ende, en la precisión de la modelación.

Problemática y justificación

La problemática del estudio se centra en la alta variabilidad que presenta el coeficiente de rugosidad de Manning, especialmente en ríos de montaña, debido a las características presentes en sistemas andinos. Esta complejidad hidráulica, genera gran incertidumbre en la selección del coeficiente cuando se utilizan valores empíricos o basados en tablas ya que no representan realmente las características reales del flujo. La situación adquiere especial relevancia debido a la elevada sensibilidad de los modelos hidráulicos frente a este parámetro, ya que pequeñas variaciones en su valor pueden provocar cambios significativos en la estimación de variables fundamentales como la velocidad, el tirante de agua e incluso la delimitación de zonas con riesgo de inundaciones. En consecuencia,

una estimación inadecuada del coeficiente puede traducirse en errores importantes en evaluaciones hidráulicas, análisis de riesgo y diseño de obras, lo que evidencia la necesidad de analizar de manera minuciosa su influencia en los parámetros hidráulicos para ríos de montaña en la provincia del Azuay.

Finalmente, la justificación del estudio se fundamenta en la necesidad de analizar la variabilidad de los resultados hidráulicos asociada a distintos valores del coeficiente de Manning, dado que su estimación influye directamente en parámetros como el tirante de agua, la velocidad y la extensión de áreas inundables. Evaluar esta sensibilidad permite identificar el grado de incertidumbre en los modelos numéricos y determinar cómo pequeñas variaciones en la rugosidad pueden generar cambios significativos en los resultados, más aún cuando se trata de entornos particularmente complejos, como los ríos de montaña. Esto fortalece el sustento técnico en el diseño y dimensionamiento de obras hidráulicas, mejora la confiabilidad de los estudios hidráulicos y respalda la gestión del riesgo, promoviendo decisiones más seguras, eficientes y técnicamente fundamentadas.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la influencia del coeficiente de rugosidad de Manning en los parámetros hidráulicos para dos ríos de montaña en la provincia del Azuay.

Objetivos específicos

Recopilar la información topográfica, batimétrica, granulométrica e hidrológica de los lugares de estudio, como base para la elaboración del modelo hidráulico.

Analizar y determinar el coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría para ríos de montaña aplicando distintos métodos.

Evaluar el comportamiento hidráulico de dos ríos de montaña considerando distintos valores del coeficiente de rugosidad de Manning mediante la modelación hidráulica en el software HEC-RAS.

Capítulo 1: Recopilación y sistematización de datos

Para la elaboración de un modelo hidráulico, se debe tener la información de los elementos naturales y del régimen del flujo de agua en el lugar de estudio. Esta información se obtiene a través de la recopilación de datos topográficos, batimétricos, granulométricos e hidrológicos, mismos que ayudan a mostrar la geometría del terreno, comportamiento del cauce y la textura del material presente.

La información para este estudio fue proporcionada por la Universidad del Azuay por el Departamento de Ingeniería Civil (UdaCivil), la misma que corresponde a datos topográficos, batimétricos, granulométricos e hidrológicos necesarios para la elaboración del modelo hidráulico.

1.1. Levantamiento Topográfico y Batimétrico

La información topográfica, hace referencia a la forma y relieve del terreno. Esta información es fundamental para describir los límites del modelo, pendientes y las probables zonas de inundación. Mientras que la información batimétrica brindará información sobre las profundidades y la morfología de los ríos, lagos o cuerpos de agua, que ayudará a identificar la sección hidráulica real por donde se mueve el flujo.

1.1.1. Alcance general

El levantamiento topográfico tuvo como objetivo establecer modelos geométricos tridimensionales precisos de los tramos de estudio en los ríos Collay y Zhio. Estos modelos permiten definir:

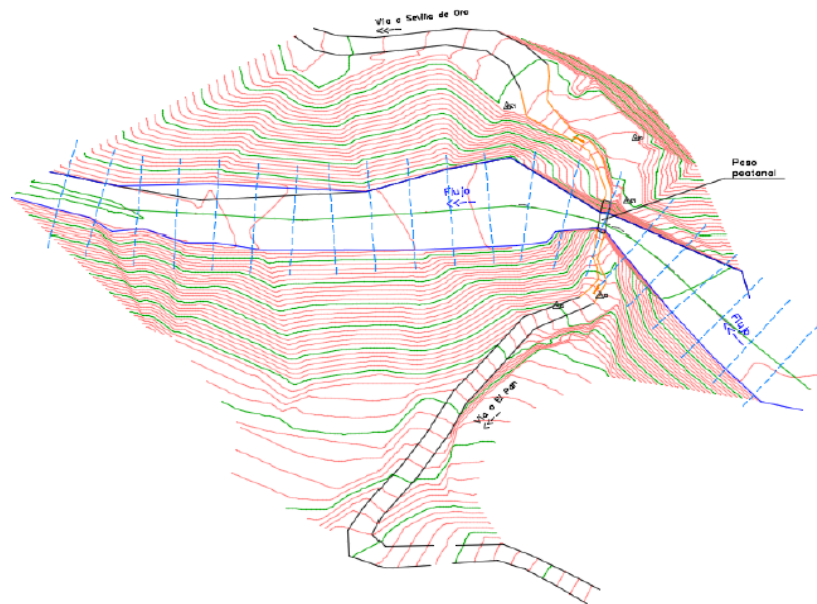
- La morfología del cauce.
- La geometría de las márgenes.
- Las cotas del terreno.
- Taludes, terrazas aluviales y zonas erosionadas.

- La ubicación exacta de los estribos actuales y proyectados.

Los levantamientos se desarrollaron bajo sistema de coordenadas UTM, Datum WGS84, zona 17S, empleando GPS diferencial (RTK) y estación total.

1.1.2. Topografía del río Collay

Figura 1-1: Levantamiento topográfico del Río Collay



Fuente: Universidad del Azuay – UdaCivil

El levantamiento abarcó aproximadamente 210 m, cubriendo 150 m aguas arriba y 150 m aguas abajo del puente existente. Se generaron:

- Secciones transversales cada 10 m.
- Perfil longitudinal del cauce.
- Modelo TIN tridimensional procesado en Civil 3D y QGIS.
- Curvas de nivel detalladas para análisis geomorfológico.

Coordenadas del centro del sitio:

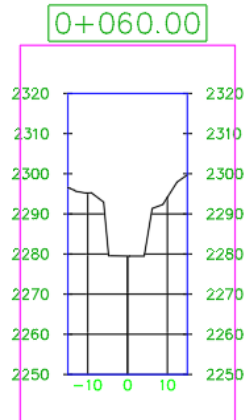
E = 761372.951 m.

$N = 9687684.773 \text{ m}$.

El análisis topográfico permitió identificar un cauce encajonado con zonas puntuales de erosión y variaciones de ancho entre 8 y 14 m.

1.1.3. Batimetría del río Collay

Figura 1-2: Ejemplo sección transversal de batimetrías, Río Collay

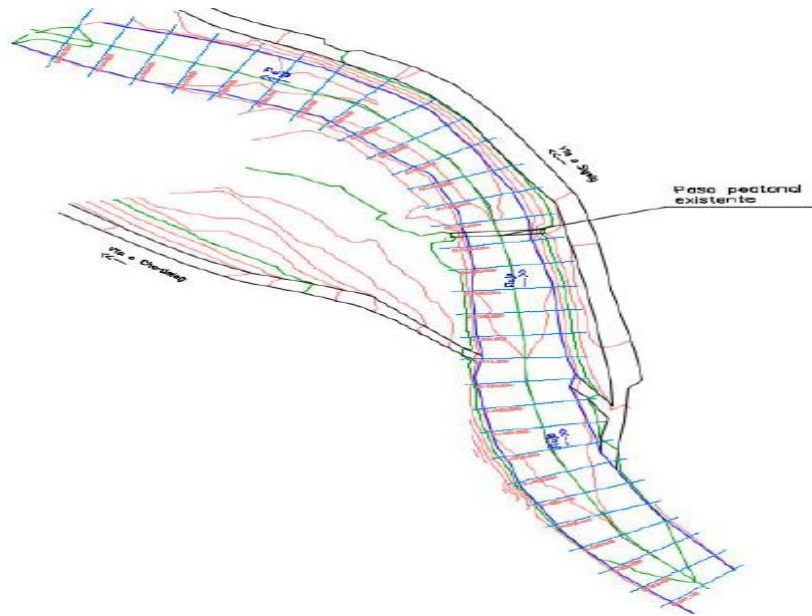


Fuente: Universidad del Azuay - UdaCivil

- Se ejecutaron secciones transversales cada 10 m sincronizadas con el levantamiento topográfico.
- Se identificó una variación de profundidad entre 0.6 y 1.8 m en estiaje.
- El modelo hidráulico permitió estimar calados, velocidades y niveles de crecida

1.1.4. Topografía río Zhío

Figura 1-3: Levantamiento topográfico del río Zhío



Fuente: Universidad del Azuay - UdaCivil

En el río Zhío se efectuó un levantamiento planialtimétrico completo alrededor del emplazamiento del puente colapsado/deteriorado, registrando:

- Márgenes del río.
- Vía de acceso y plataforma del puente.
- Taludes laterales y terrazas estrechas.

Coordenadas del punto central de estudio:

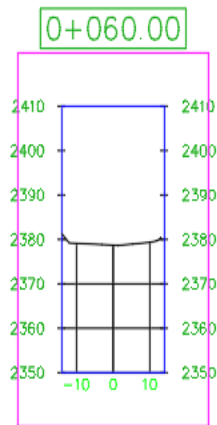
E = 747530.00 m.

N = 9668514.00 m.

Las cotas de terreno varían entre 2380 y 2382 msnm, con un cauce más estrecho que el del río Collay y con presencia de taludes pronunciados.

1.1.5. Batimetría del río Zhío

Figura 1-4: Ejemplo sección transversal de batimetrías, río Zhio



Fuente: Universidad del Azuay - UdaCivil

Debido a la configuración estrecha del cauce y la presencia de material granular, la batimetría reveló:

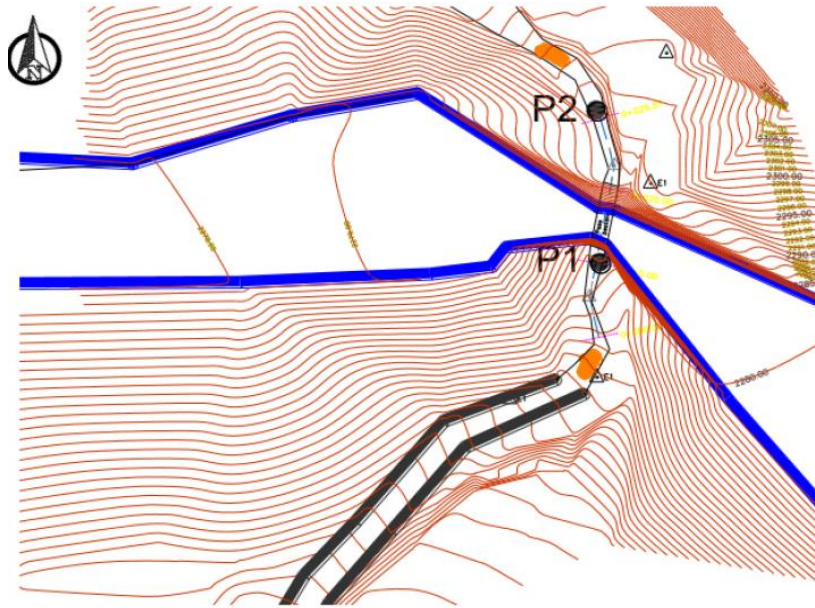
- Profundidades variables entre 1.0 y 2.3 m.
- Estrechamientos que incrementan velocidades.
- Pendientes más pronunciadas que en el río Collay.

1.2. Levantamiento Geotécnico

La granulometría se refiere al tamaño y a la distribución de las partículas que conforman el lecho y los márgenes. Este parámetro determina la rugosidad del cauce, erosión, desplazamiento de los sedimentos y el movimiento del agua. Finalmente, el estudio geotécnico tuvo como finalidad determinar la estratigrafía, capacidad portante, nivel freático, parámetros de resistencia y profundidad de cimentación recomendada para los puentes proyectados.

1.2.1. Geotecnia en el río Collay

Figura 1-5: Ubicación de las perforaciones realizadas, río Collay



Fuente: Universidad del Azuay - UdaCivil

1.2.1.1 Exploración de campo

Se ejecutaron dos exploraciones:

- P1 – Estribo Sur.
- P2 – Estribo Norte.

Ambas perforaciones mostraron rechazo a 1 m de profundidad, debido a la presencia de un macizo metamórfico competente. Se complementó con pozos a cielo abierto de 2.5 m. No se detectó nivel freático, condición favorable para cimentación.

1.2.1.2 Litología

Suelos coluvio – aluviales:

- Gravas subangulosas.
- Arenas gruesas a medias.
- Fino arcilloso no plástico a ligeramente plástico.

Clasificación:

- SUCS: SP-SC y SC.
- AASHTO: A-2-6.

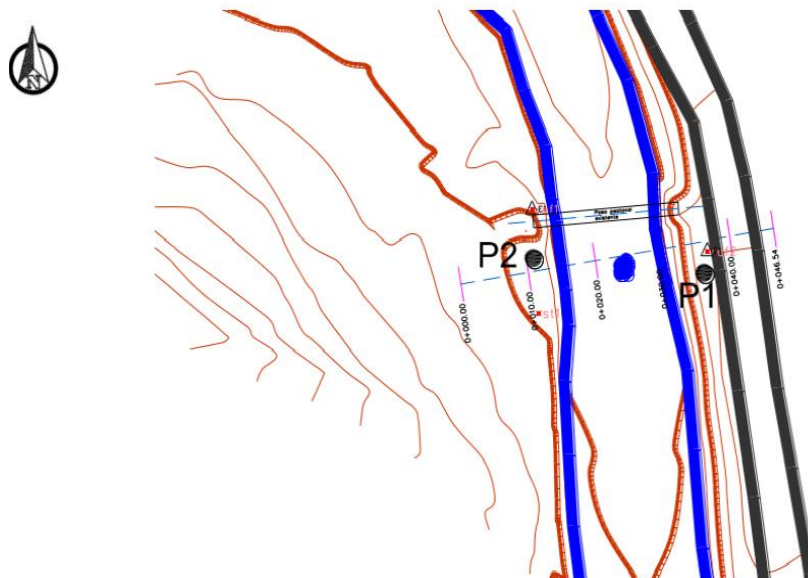
1.2.1.3 Parámetros de diseño

Por correlaciones típicas:

- $\phi' \approx 30^\circ$.
- $c' \approx 10$ kPa.
- $\gamma = 18-20$ kN/m³.

1.2.2. Geotecnia en el río Zhio

Figura 1-6: Ubicación de las perforaciones realizadas, Río Zhio



Fuente: Universidad del Azuay - UdaCivil

1.2.2.1 Exploración de campo

Se realizaron dos sondeos SPT de 4 m (P1 en estribo este y P2 en estribo oeste).

La perforación fue limitada por gravas gruesas y boleos.

1.2.2.2 Nivel freático

Detectado alrededor de:

- 2377.50 msnm.

1.2.2.3 Litología

Suelos derivados de la Formación Tarqui, compuestos por materiales granulares:

- Arena gravo–arcillosa (SC).
- Boleos volcánicos dacíticos/riolíticos.
- Tobas ácidas y depósitos piroclásticos alterados.

Clasificación:

- SUCS: SC.
- AASHTO: A-2-6.

1.2.2.4 Parámetros de resistencia

Con base en N60 entre 28 y 32:

- $\phi' \approx 30^\circ$.
- $c = 0$.

1.2.2.5 Profundidad de cimentación recomendada

Condicionada por socavación máxima:

- $D_f \approx 5.00$ m.
- Cota de cimentación = 2375.15 msnm.

1.3. Integración comparativa de los levantamientos en ambos ríos

Tabla 1-1. Comparación de parámetros geotécnicos y geomorfológicos entre los ríos Collay y Zhío

Parámetro	Río Collay	Río Zhío
Tipo de levantamiento	Completo (topo-geo-batimetría).	Completo (topo-geo-batimetría).
Litología dominante	Aluvial + Metamórfico.	Piroclástica ácida + Granular.
Clasificación SUCS	SP-SC / SC.	SC.
Clasificación AASHTO	A-2-6.	A-2-6.

Fuente: Universidad del Azuay – UdaCivil

1.4 Estudio Hidrológico

El estudio hidrológico de los puentes sobre los ríos Zhío y Collay se desarrolló siguiendo una metodología común, basada en información cartográfica del IERSE, registros hidrometeorológicos oficiales del INAMHI y el uso de modelos hidrológicos ampliamente aceptados en la ingeniería civil. Ambas cuencas pertenecen a la demarcación hidrográfica del río Santiago, dentro de la cuenca del río Paute, y presentan características propias de cuencas de montaña, con elevadas pendientes medias, relieves escarpados y tiempos de respuesta cortos, lo que favorece una rápida generación de escorrentía durante eventos de precipitación intensa.

La estimación de la escorrentía superficial se realizó mediante el método del Soil Conservation Service (SCS), utilizando el Número de Curva (CN) como parámetro representativo de las condiciones de uso del suelo y tipo de suelo, determinados a partir de la cartografía del IERSE. Las cuencas fueron subdivididas en subcuencas para representar adecuadamente la variabilidad topográfica y de cobertura, calculándose los tiempos de concentración mediante las expresiones empíricas de Kirpich, Tonini y Rowe.

La caracterización de la precipitación se basó en las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) del INAMHI (2019), a partir de las cuales se generaron hietogramas de diseño ajustados a los tiempos de concentración. La modelación lluvia–escorrentía se efectuó con el software HEC-HMS, obteniéndose los hidrogramas de crecida para períodos de retorno de 25 años (evento de diseño) y 50 años (condición de verificación).

En los apartados siguientes se detallan las características principales de ambos ríos objeto de estudio.

Tabla 1-2. Resumen del estudio Hidrológico del Río Zhío

Parámetro	Valor / Descripción
Ubicación del proyecto	Río Zhío, parroquia Guel, cantón Sigsig, provincia del Azuay
Área de la cuenca	8.094,41 ha
Longitud del cauce principal	14,79 km
Desnivel del cauce	1.039 m
Pendiente media de la cuenca	54,32 %
Tipo de suelo (SCS)	Grupo C (arenoso–arcilloso)
Número de Curva (CN)	71 (ponderado)
Número de subcuencas	3
Tiempo de concentración (Tc)	≈ 60–66 min
Fuente de precipitación	Curvas IDF INAMHI – Estación M0139 Gualaceo
Método de modelación	SCS – HEC-HMS
Período de retorno de diseño	25 años
Caudal máximo (T = 25 años)	71,95 m ³ /s
Caudal máximo (T = 50 años)	81,22 m ³ /s
Aplicación de resultados	Análisis hidráulico, niveles de agua, velocidades y socavación del puente

Fuente: Universidad del Azuay - UdaCivil

Tabla 1-3. Resumen del estudio Hidrológico del Río Collay

Parámetro	Descripción / Valor
Ubicación del proyecto	Río Collay, parroquia San Vicente, cantón El Pan, provincia del Azuay
Demarcación hidrográfica	Demarcación del Santiago – Cuenca del Río Paute
Área de la cuenca	13.049,42 ha
Perímetro de la cuenca	63,42 km
Longitud del cauce principal	24,82 km
Cota máxima de la cuenca	≈ 3.749 m s.n.m.
Cota en el punto de interés	≈ 2.325 m s.n.m.
Desnivel del cauce	1.065 m
Pendiente media de la cuenca	49,50 %
Tipo de suelo (SCS)	Grupo Hidrológico B (arenoso–arcilloso)
Uso y cobertura del suelo	Pastos y cultivos, páramo, vegetación arbustiva, bosque nativo, plantaciones forestales y áreas intervenidas
Número de Curva (CN)	65 (ponderado)
Número de subcuencas	4
Área de subcuencas	27,27 – 38,28 km ²
Longitud de cauces por subcuenca	5,89 – 10,25 km
Pendiente longitudinal máxima	0,098 m/m
Tiempo de concentración (T _c)	1,02 – 1,43 h (61–86 min)
Fuente de precipitación	Curvas IDF INAMHI (2019), estación M0139 Gualaceo (2.230 m s.n.m., 26 años de datos)
Método hidrológico	Soil Conservation Service (SCS)
Software de modelación	HEC-HMS
Período de retorno de diseño	25 años
Caudal máximo (T = 25 años)	47,06 m ³ /s
Caudal máximo (T = 50 años)	55,50 m ³ /s
Aplicación de resultados	Análisis hidráulico del cauce, niveles de agua, velocidades y evaluación de socavación en el puente

Fuente: Universidad del Azuay - UdaCivil

Capítulo 2: Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning

La determinación del coeficiente de rugosidad de Manning es un proceso esencial en la hidráulica de canales y cauces naturales, porque permite evaluar cómo se comporta el flujo a lo largo de su recorrido. Una correcta selección del coeficiente es fundamental para obtener resultados confiables en el cálculo de caudales, niveles de flujo y velocidades, desempeñando un papel clave tanto en el análisis como en el diseño de obras hidráulicas.

En este capítulo se lleva a cabo bajo tres enfoques complementarios: (i) formulaciones que están basadas en la granulometría del material, (ii) formulaciones basadas en los parámetros hidráulicos, y (iii) una revisión bibliográfica de investigaciones previas que se llevaron a cabo en ríos de montaña. De este modo, se incorporará una revisión bibliográfica, la aplicación práctica y la documentación técnica, de acuerdo a los métodos definidos anteriormente.

El presente capítulo tiene por finalidad proporcionar criterios técnicos confiables para seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning, vinculando antecedentes, estudios de casos y formulaciones empíricas, con la finalidad de disminuir la incertidumbre correspondiente en sus cauces naturales.

2.1. Coeficiente de rugosidad de Manning

Según Manning (1891) y Chow (1959), el coeficiente de rugosidad, representado por la letra n , es un parámetro hidráulico fundamental en el análisis de canales abiertos, dado que cuantifica la resistencia hidráulica generada por el lecho y las superficies en contacto con el agua. Este coeficiente depende de varios factores, entre los cuales se incluyen las características hidráulicas del flujo, la cobertura vegetal, la composición granulométrica del lecho, la curvatura del cauce y la irregularidad superficial.

El valor del coeficiente n influye de manera directa en el cálculo de la velocidad media y del caudal a través de la ecuación de Manning, por lo que su correcta determinación es fundamental para la evaluación y planificación de obras hidráulicas y fluviales, particularmente en ríos de montaña donde la rugosidad del cauce es alta y variable (French, 1985).

2.2. Formulaciones para la determinación del coeficiente de Manning

Autores como Soomro et al. (2021) y Lamichhane et al. (2023) mencionan que, a través de distintas formulaciones se puede realizar la determinación del coeficiente de Manning. Estas son formulas empíricas que se obtienen a partir de observaciones y datos experimentales y semiempíricas que combina fundamentos teóricos con resultados experimentales. Los criterios principales son la formulación basada en la granulometría, la formulación basada en parámetros hidráulicos y la formulación basada en tablas.

2.2.1. Formulaciones basadas en la granulometría del lecho

La formulación granulométrica vincula el coeficiente de Manning con el tamaño del material del lecho del río, representados por diámetros característicos como D_{50} , denominado diámetro medio y D_{84} , denominado diámetro efectivo grueso, que se obtienen mediante un análisis granulométrico.

Varios autores, como Strickler (1923), Meyer-Peter & Müller (1948), Einstein (1950), entre otros, han planteado formulaciones empíricas que relacionan la rugosidad con el tamaño de las partículas del lecho, considerando que el flujo actúa de manera directa con las partículas de estos materiales. Estas expresiones se aplican particularmente en ríos de montaña en donde hay presencia de materiales gruesos tales como bloques, fragmentos de roca de tamaño medio a grande y gravas. De manera general estas ecuaciones indican

que cuando el tamaño de la partícula es grande, el valor del coeficiente de rugosidad es mayor, debido al aumento de la resistencia del flujo.

2.2.1.1. Formulación de Strickler (1923)

Propuesta por Albert Strickler, la misma que asocia el coeficiente de Manning con el diámetro característico del sedimento:

$$n = 0.041 * d_{50}^{\frac{1}{6}}$$

Donde:

- n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
- d_{50} = Diámetro del material del lecho que representa el tamaño medio de las partículas del canal (m)

La aplicación de esta ecuación se usa principalmente para canales abiertos y ríos aluviales.

En sus alcances y limitaciones, esta ecuación no toma en consideración la curvatura del cauce, las irregularidades del lecho y la vegetación.

2.2.1.2. Formulación de Meyer-Peter & Müller (1948)

La ecuación de Meyer-Peter y Müller es una expresión que estima el coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales a través del tamaño del sedimento del lecho. Esta fórmula, usa el diámetro d_{90} para mostrar el efecto que tiene las partículas más gruesas en la resistencia al flujo del agua:

$$n = 0.038 * d_{90}^{\frac{1}{6}}$$

Donde:

- n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
- d_{90} = Diámetro del material del lecho que representa el tamaño característico de las partículas más gruesas del canal (m).

La aplicación de esta ecuación es utilizada en lechos que están compuestos por grava gruesa y piedras grandes, además de analizar la capacidad del canal para mantener la su forma, dimensiones y la socavación del mismo.

En cuanto a su aplicabilidad y restricciones, esta ecuación no es recomendable usarse en arenas finas y canales superficiales.

2.2.1.3. Formulación de Einstein (1950)

Esta ecuación la planteo Einstein considerando el movimiento de los sedimentos y la rugosidad que tiene el cauce, la misma está ligada a la rugosidad del lecho, el flujo turbulento y el tamaño del sedimento:

$$n = k * d_{50}^{\frac{1}{6}}$$

Donde:

- n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
- d_{50} = Diámetro medio del sedimento del lecho (m)
- k = Constante empírica que depende del régimen del flujo y la forma del lecho, el valor de k es de aproximadamente 0.041, si el cauce natural es definido.

Sin embargo, cuando el lecho es granular uniforme el valor de k es de 0.038 – 0.042, mientras que cuando el lecho es irregular, k es de 0.042 – 0.045.

La aplicación de esta ecuación se usa para ríos de gravas grandes o que tienen lechos rocosos, no mide de manera directa el caudal y la velocidad media cuando se conoce la granulometría.

En sus alcances y limitaciones, esta ecuación no toma en consideración la geometría del canal ni la pendiente que tiene el cauce y no tiene ningún tipo de obstrucciones.

2.2.1.4. Formulación de Limerinos (1963)

La ecuación de Limerinos estima el coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales tomando en cuenta las características hidráulicas del flujo y el tamaño del sedimento del lecho. Con este propósito, incluye el diámetro característico d_{84} , el radio hidráulico R , reflejando la rugosidad relativa y la resistencia hidráulica:

$$n = \frac{0.038}{\left[\log \left(\frac{R}{d_{84}} \right) \right]^2}$$

Donde:

- n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
- R = Radio hidráulico del canal = $\frac{A}{P}$ (m)
- d_{84} = Diámetro representativo de las partículas del lecho (m)

La aplicación de esta ecuación es primordialmente en ríos naturales que tienen una distribución granulométrica, gravas y bloques.

En el campo de aplicación y limitaciones, es sensible a errores de su radio hidráulico del canal R , la determinación de d_{84} y no se debe utilizar en canales con baja rugosidad o canales que están cubiertos de un solo material.

2.2.1.5. Formulación de Simons & Sentürk (1977)

Esta expresión estima el coeficiente de rugosidad de Manning n en cauces naturales solamente a través del diámetro característico medio del lecho d_{50} , de manera que refleja la influencia que tiene el tamaño del sedimento en la rugosidad del canal:

$$n = 0.047 * d_{50}^{\frac{1}{6}}$$

Donde:

- n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
- d_{50} = Diámetro representativo del sedimento (m)

La ecuación se aplica en ríos o canales aluviales de lecho arenoso o gravoso al igual se usa para estimar de manera preliminares su caudal y velocidad.

En su ámbito de uso y restricciones, no se considera en árboles, arbustos, bordes irregulares, bloques de gran tamaño y pozos.

2.2.2. Formulaciones basadas en parámetros hidráulicos

Este planteamiento toma en cuenta el coeficiente de Manning no solamente del material del lecho, sino también de los parámetros hidráulicos del flujo, tales como es el movimiento del flujo, la profundidad, la pendiente del cauce y el radio hidráulico.

Algunos autores como, Lane & Carlson (1953), Brater & King (1976), Jarret (1984), entre otros, han planteado que las formulaciones que relacionan n con la geometría hidráulica del cauce y las características con las que fluye el agua, considerando que la resistencia del flujo no está determinada del tamaño del sedimento, sino que al igual del movimiento del flujo y de la acción que hay entre el agua y el lecho.

En los ríos de montaña, este tipo de formulación es apropiado, ya que el canal natural tiene distintos cambios notables en la sección y la pendiente, los cuales ocurren con frecuencia en los mismos.

2.2.2.1. Formulación de Lane & Carlson (1953)

Esta ecuación de Lane & Carlson se basa en la pendiente que tiene el cauce S y en el radio hidráulico efectivo, tomando en cuenta que la rugosidad incrementa con la pendiente y reduce cuando el radio hidráulico es mayor:

$$n = \frac{0.032 * S^{\frac{1}{2}}}{R^{\frac{1}{6}}}$$

Donde:

- n = Coeficiente de Manning (adimensional)
- R = Radio hidráulico = $\frac{A}{P}$ (m)
- S = Pendiente del cauce (m/m)

Esta ecuación es muy utilizada para estimar el coeficiente de rugosidad de Manning en canales naturales y ríos de montaña a través de los parámetros hidráulicos como la pendiente y el radio hidráulico, facilitando aproximaciones del caudal y velocidad media.

En cuanto a su aplicabilidad y restricciones, esta ecuación no considera la granulometría del lecho ni la vegetación, y su precisión disminuye en cauces que tienen cambios bruscos de sección, irregularidades o varios canales.

2.2.2.2. Formulación de Brater & King (1976)

La fórmula desarrollada por Brater y King, estima el coeficiente de rugosidad de Manning n a partir de parámetros hidráulicos medibles en canales, particularmente de la pendiente

y el radio hidráulico, tomando en cuenta que la resistencia al flujo está condicionada por las condiciones del flujo uniforme y de la geometría de la sección:

$$C = 26.8 * R^{\frac{1}{6}}$$

Donde:

- C = Coeficiente de Chézy ($m^{\frac{1}{2}} * s^{-1}$)
- R = Radio hidráulico = A/P (m)

Derivación correcta en Relación con Manning

$$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}};$$

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{C};$$

La aplicación de esta ecuación se utiliza para estimar el coeficiente de rugosidad de Manning en canales y ríos usando parámetros hidráulicos como la pendiente y el radio hidráulico, permitiendo aproximaciones de caudal y velocidad media.

En cuanto a su aplicabilidad y restricciones, esta ecuación no toma en cuenta la granulometría del lecho ni la vegetación, y su precisión se reduce en cauces con flujo no uniforme, cambios bruscos de sección o irregularidades locales.

2.2.2.3. Formulación de Jarret (1984)

La expresión que desarrollo Jarrett (1984) fue propuesta a partir de mediciones que se realizaron en campo en ríos de montaña, incluyendo la pendiente del cauce como el radio hidráulico:

$$n = 0.39 * R^{-0.16} * S^{0.38}$$

Donde:

- n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
- R = Radio hidráulico (m)
- S = Pendiente del cauce (m/m)

La aplicación de esta expresión considera que en los ríos que tienen una alta pendiente como una elevada resistencia al flujo, la misma incrementa de manera significativa, por lo que depende igual de la geometría hidráulica que tiene la sección.

En cuanto a su aplicabilidad y restricciones, esta expresión es usada en ríos de montaña, que tienen altas pendientes y lechos gruesos. No es favorable utilizarla en canales artificiales, cauces de baja pendiente y debe ser limitada a flujos uniformes.

2.2.2.4. Formulación de Yen (1992)

Algunos ajustes empíricos analizados por Yen (1992) plantea una estimación del coeficiente de Manning basada de manera específica en los parámetros hidráulicos, tales como es la pendiente el radio hidráulico, a partir del ajuste empírico como el análisis dimensional.

$$n = 0.032 * R^{0.17} * S^{-0.25}$$

Donde:

- n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
- R = Radio hidráulico (m)
- S = Pendiente del cauce (m/m)

La aplicación de esta ecuación depende del coeficiente de rugosidad con la geometría que tiene la sección al igual de la energía que tiene el flujo.

En cuanto a su aplicabilidad y restricciones, esta ecuación es válida y usada para flujos uniformes tanto en canales artificiales como naturales, ya que al no tomar en consideración parámetros de rugosidad física del lecho, su utilización debe limitarse a casos donde la resistencia debe estar bajo control principalmente de las condiciones hidráulicas globales.

2.2.3. Métodos empíricos basados en caracterización del cauce

Esta metodología se basa en el uso de tablas empíricas que dan valores del coeficiente de Manning en función de la clase del canal al que pertenece, las márgenes, el material del lecho al igual de las condiciones superficiales del cauce. Estas tablas se han planteado a partir de observaciones que se han realizado en el campo, ensayos experimentales y antecedentes en varios canales y tipos de flujos.

Autores como Manning (1891), Cowan (1956), entre otros, han planteado valores típicos de n para los canales tanto artificiales como naturales, tomando en cuenta factores como los cambios de la sección transversal, el grado de alineamiento del flujo, la irregularidad del cauce, la presencia de vegetación y la rugosidad del material. En este caso para ríos de origen natural, el valor final de Manning se obtiene a través de la corrección total que se tiene al agregar distintas correcciones individuales de estos efectos.

Este método es utilizado por su aplicabilidad práctica, en estudios y proyectos donde no se tiene información que detalle el flujo o la granulometría del lecho, la selección del valor depende de la interpretación de las condiciones del cauce como del criterio adoptado del ingeniero o del investigador.

2.2.3.1. Formulación de Manning (1891)

La expresión propuesta por Manning establece una relación empírica entre las características hidráulicas del canal y la velocidad media del flujo:

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{V}$$

Donde:

- n = Coeficiente de Manning (adimensional)
- R = Radio hidráulico del cauce (m)
- S = Pendiente del cauce (m/m)
- V = Velocidad media del flujo (m/s)

Los valores propuestos por este autor son valores típicos de n en función del tipo de canal y del material del lecho, los mismos que fueron organizados en tablas por varios autores.

Algunos de estos valores son los siguientes:

Tabla 2-1. Valores usados del coeficiente de Manning para cauces naturales

Tipo de cauce	Material predominante	n típico
Canal natural limpio	Arena	0.025 – 0.030
Canal natural	Grava fina	0.028 – 0.033
Canal natural	Grava gruesa	0.030 – 0.040
Fondo rocoso irregular	Roca expuesta	0.035 – 0.050
Río de montaña	-Gravas y bloques	0.040 – 0.070
Río de montaña muy rugoso	Bloques grandes	0.060 – 0.090

Fuente: Chow, 1959

La ecuación se aplica en canales artificiales como en ríos de montaña y sirve como base para varios métodos posteriores de estimación del coeficiente de rugosidad.

En su ámbito de uso y restricciones, presenta una menor precisión en ríos que tienen una alta variabilidad geométrica, pendientes pronunciadas y una alta concentración de vegetación.

2.2.3.2. Formulación de Cowan (1956)

Esta fórmula establecida por Cowan propone un método empírico para la determinación del coeficiente de rugosidad de Manning en canales naturales como en ríos, tomando en consideración que la resistencia al flujo está regida por las condiciones geométricas, hidráulicas, superficiales del cauce y el material del lecho:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m$$

Donde:

- n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)
- n_0 = Valor base de rugosidad asociado al material del lecho
- n_1 = Factor de corrección por irregularidades superficiales
- n_2 = Factor de corrección por variaciones en la sección transversal
- n_3 = Factor de corrección por obstrucciones presentes en el cauce
- n_4 = Factor de corrección por vegetación y condiciones del flujo
- m = Factor de corrección por grado de meandreamiento del cauce

Los valores de n_0, n_1, n_2, n_3, n_4 y m , se obtienen a través de tablas empíricas propuestas por el mismo autor, las mismas que se basan en observaciones de canales naturales y campo en ríos. Estos son los rangos:

Tabla 2-2. Valores a seleccionar a través del Método de Cowan

Condiciones del Canal		Valores
Material involucrado	Tierra	0.020
	Corte en roca	0.025
	Grava fina	0.024
	Grava gruesa	0.028
Grado de irregularidad	Suave	0.000
	Menor	0.005
	Moderado	0.010
	Severo	0.020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	0.000
	Frecuentemente alternante	0.005
	Ocasionalmente alternante	0.010 - 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	0.000
	Menor	0.010 - 0.015
	Apreciable	0.020 - 0.030
	Severo	0.040 - 0.060
Vegetación	Baja	0.005 - 0.010
	Media	0.010 - 0.025
	Alta	0.025 - 0.050
Grado de los efectos por meandros	Muy alta	0.050 - 0.100
	Menor	1.000
	Apreciable	1.150
	Severo	1.300

Fuente: Chow, 1994

Su aplicación es muy utilizada en estudios de diseño hidráulico, estimación de caudales y velocidades en cauces naturales.

En el ámbito de restricciones y su uso, no toma en consideración los parámetros hidráulicos como la pendiente del flujo, la precisión y profundidad.

2.3.Revisión de literatura sobre ríos de montaña

Múltiples investigaciones sobre la determinación del coeficiente de Manning en ríos de montaña han sido investigadas por varios autores, mismos que concuerdan que estos canales naturales poseen valores de rugosidad mayores a los ríos de pendiente baja, debido a la existencia de alta pendiente, morfología irregular y a la presencia de material grueso.

2.3.1. Estudios en base a la literatura sobre ríos de montaña

El estudio desarrollado por Timbe Castro et al. (2022), analiza la sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning en la estimación de niveles de crecida y en el mapeo de inundaciones en ríos de montaña. Su zona de estudio se centró en el cauce del río Santa Bárbara, ubicado en el cantón Gualaceo, Ecuador, donde se evidenció que la correcta calibración del coeficiente de Manning es determinante para la obtención de resultados hidráulicos confiables. En dicho estudio se adoptó un valor calibrado de $n = 0,035$ para el cauce principal, sustentado en las características geomorfológicas y granulométricas del río, constituyéndose en un referente metodológico para investigaciones desarrolladas en contextos fluviales similares.

Por su parte, Díaz-Salas et al. (2020) aseguró que la granulometría del lecho es uno de los factores más influyentes en la determinación del coeficiente de rugosidad de Manning, al condicionar directamente la resistencia al flujo en ríos de montaña. A partir de su estudio realizado en el río Santa, en el tramo Recuay–Carhuaz, departamento de Áncash, Perú, el autor aplicó análisis granulométricos y formulaciones empíricas para la estimación de la rugosidad hidráulica. Como resultado, obtuvo un valor promedio del coeficiente de Manning de $n = 0,042$, representativo de un cauce con predominio de material grueso y una morfología irregular.

Asimismo, Martínez Ramírez & Solano González (2020) afirmaron que la integración de métodos empíricos con la modelación hidráulica constituye una herramienta eficaz para la determinación del coeficiente de rugosidad en cauces naturales. En su investigación desarrollada en el río Tomebamba en la ciudad de Cuenca - Ecuador, empleó diversas formulaciones, entre ellas Meyer-Peter y Müller, Raju y Raudkivi, las cuales fueron incorporadas en un modelo hidráulico unidimensional mediante el software HEC-RAS. Los resultados obtenidos permitieron establecer que el coeficiente de Manning para este

río se encuentra en un rango comprendido entre 0,031 y 0,043, valores coherentes con un lecho aluvial compuesto por gravas y cantos, característico de ríos de montaña.

Finalmente, Fernández de Córdova et al. (2020) afirmaron que el coeficiente de Manning presenta una elevada variabilidad en ríos de montaña debido a la complejidad geomorfológica del cauce, la pendiente y el tipo de material del lecho. En su estudio aplicado al río Yanuncay ubicado en la ciudad de Cuenca - Ecuador, los autores reportaron valores del coeficiente de rugosidad comprendidos entre 0,031 y 0,073, obtenidos mediante distintos métodos empíricos y mediciones de campo. A partir de este conjunto de resultados, propusieron como valor representativo un promedio de $n = 0,055$, el cual integra de manera adecuada los efectos de la rugosidad del lecho y la irregularidad del cauce, aportando un criterio de referencia sólido para estudios hidráulicos en ríos de montaña.

2.4. Aplicación del coeficiente de Manning en el estudio

En base a las referencias citadas anteriormente para ríos de montaña, escoger un valor representativo de n debe considerar el análisis de comparación con valores recomendados en investigaciones previas en ríos de montaña, las características granulométricas del lecho y los parámetros hidráulicos obtenidos.

Este análisis permite reducir la variabilidad asociada a la selección del coeficiente de rugosidad adecuado y garantiza una representación confiable de las características hidráulicas del cauce natural estudiado.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los estudios realizados por los autores mencionados, indicando el coeficiente de rugosidad de Manning y la altitud correspondiente a cada una de las áreas de estudio. La altitud se incluye como referencia

geográfica; sin embargo, la condición del río de montaña se sustenta principalmente en sus características geomorfológicas y de pendiente.

Tabla 2-3. Valores a seleccionar a través del Método de Cowan

Autores	País	N	Altitud (m.s.n.m)	Pendiente m/m
Timbe et al. (2022)	Ecuador	0.035	2230	0.0025
Díaz-Salas et al. (2020)	Perú	0.042	2743	0.0038
Solano & Martínez (2020)	Ecuador	0.031- 0.073	2550	0.0037
Fernandez de Córdova et al. (2020)	Ecuador	0.055	2560	0.0020

Fuente: Autores

2.4.1. Aplicación en base a la granulometría

A continuación, se desarrolló la aplicación en base a la información granulométrica del cauce proporcionada por el departamento de UdaCivil.

2.4.1.1. Interpolación de los percentiles d_{90} , d_{84} y d_{50} del Río Collay y del Río Zhío

Tabla 2-4. Interpolación de los percentiles d_{90} , d_{84} y d_{50}

Río Collay	
d_{90}	0.01326 m
d_{84}	0.01153 m
d_{50}	0.00163 m

Fuente: Autores

Tabla 2-5. Interpolación de los percentiles d_{90} , d_{84} y d_{50}

Río Zhío	
d_{90}	0.02002 m
d_{84}	0.01192 m
d_{50}	0.00060 m

Fuente: Autores

Tabla 2-6. Resumen de los valores de “n” de los autores basados en formulación granulométrica

Autores	Río Collay (n)	Río Zhío (n)
Strickler (1923)	0.0141	0.0119
Meyer-Peter & Müller (1948)	0.0189	0.0198
Einstein (1950)	0.0151	0.0125
Limerinos (1963)	0.0060	0.0079
Simons & Sentürk (1977)	0.0161	0.0137

Fuente: Autores

El análisis de los resultados obtenidos de la Tabla 2-6 indica que la información disponible no es representativa para el estudio, debido a que las muestras fueron tomadas directamente en las márgenes del cauce y no en el canal principal donde se proyecta la intervención. Esta diferencia es relevante, ya que las condiciones hidráulicas y sedimentológicas en las márgenes se diferencian del cauce principal. En particular, en las marginales la velocidad que tiene el flujo es menor, lo que minimiza el arrastre y el transporte de sedimentos y favorece la deposición de materiales finos.

En ríos de montaña, por el contrario, las pendientes son más pronunciadas y las velocidades del flujo son significativamente mayores, lo que genera procesos de erosión y transporte más intensos, reflejándose en parámetros hidráulicos y granulométricos más elevados. Por esta razón, los datos obtenidos no representan adecuadamente las condiciones reales del cauce. Aunque los valores del coeficiente de rugosidad de Manning estimados mediante fórmulas granulométricas no fueron adoptados en la modelación hidráulica posterior, en este apartado se desarrolló el fundamento teórico y el procedimiento metodológico correspondiente. De este modo, el contenido queda como referencia para futuras investigaciones o aplicaciones en las que se disponga de información de campo más representativa.

2.4.2. Aplicación en base a parámetros hidráulicos

A continuación, se desarrolló la aplicación en base a la información de los parámetros hidráulicos del cauce proporcionada por el departamento de UdaCivil.

Tabla 2-7. Resumen de los valores de “n” de los autores basados en formulación de parámetros hidráulicos

Autores	Río Collay (n)	Río Zhío (n)
Lane & Carlson (1953)	0.040	0.0356
Brater & King (1976)	0.037	0.037
Jarret (1984)	0.075	0.0736
Yen (1992)	0.1032	0.104

Fuente: Autores

Del análisis de los resultados presentados en la Tabla 2-7 se observa que los valores del coeficiente de rugosidad de Manning n son altos para ambos ríos, especialmente los obtenidos a través de las formulaciones de Jarret (1984) y Yen (1992) respectivamente. Estos valores grandes y coherentes con las características de los ríos de montaña, donde predominan lechos irregulares, pendientes pronunciadas, presencia de gravas y bloques es decir material grueso y una elevada turbulencia del flujo

El incremento en los valores de n refleja una mayor resistencia al flujo, influenciada por la rugosidad del cauce, la variabilidad geométrica de la sección y la interacción del agua con elementos como rocas y vegetación ribereña. Por lo tanto, estos resultados sí representan las condiciones hidráulicas reales de los ríos Collay y Zhío, concordando con el comportamiento típico que tienen los cauces de montaña y garantizando su validez para el análisis desarrollado en la tesis.

2.4.3. Aplicación de métodos empíricos basados en caracterización del cauce

A continuación, se desarrolló la aplicación en base a tablas para comparar con la información del cauce proporcionada por el departamento de UdaCivil.

Tabla 2-8. Resumen de los valores de “n” de los autores basados en tablas

Autores	Río Collay (n)	Río Zhío (n)
Cowan (1956)	0.048	0.058

Fuente: Autores

Del análisis de los resultados presentados en la Tabla 2-8 se observa un cambio significativo en los valores del coeficiente de rugosidad de Manning n según el autor. En el caso de Cowan (1956), los valores obtenidos de aproximadamente 0.0480 para el río Collay y 0.0580 para el río Zhío respectivamente son altos y cumplen con las características de ríos de montaña, donde la presencia de material grueso, irregularidad del lecho y variaciones en la sección transversal incrementan la resistencia al flujo.

Capítulo 3: Modelación hidráulica de los ríos de montaña

Según Sturm (2021) y Akan & Iyer (2021), la modelación hidráulica es esencial para analizar, comprender y predecir el comportamiento del flujo en canales abiertos, aplicando principios fundamentales y herramientas matemáticas. Es primordial para el diseño y evaluación de obras hidráulicas, ya que permite aproximar las condiciones de flujo, niveles de agua, velocidades, permitiendo un diseño seguro y eficiente.

La modelación hidráulica es un proceso en el cual se expresa matemáticamente el comportamiento del agua en movimiento, con la finalidad de analizar, diseñar y proyectar sistemas hidráulicos. Facilita simular como el agua se desplaza en canales abiertos, estructuras hidráulicas, ríos y tuberías bajo diferentes condiciones.

La misma se basa en principios fundamentales de la mecánica de fluidos:

- Conservación de cantidad de movimiento.
- Conservación de energía.
- Conservación de masa.

En canales abiertos se usan ecuaciones diferenciales, modelos matemáticos que ayuda a modelar el comportamiento del movimiento no permanente.

El presente estudio tiene un enfoque cuantitativo, debido a que el mismo analiza la influencia del coeficiente de rugosidad de Manning sobre diferentes parámetros hidráulicos a través del uso de datos cuantificables. El estudio es de tipo aplicado, ya que el mismo busca generar conocimiento técnico que pueda utilizarse en futuros estudios hidráulicos al igual que en el diseño de obras en ríos de montaña en la provincia del Azuay. Asimismo, corresponde a un estudio comparativo y experimental numérico, ya que este evalúa el comportamiento hidráulico de los ríos ante la variación del coeficiente de Manning, utilizando modelación.

3.1. Tipos de modelos en la modelación hidráulica

Los modelos hidráulicos son representaciones simplificadas del comportamiento que tiene el flujo en sistemas de canales abiertos, que se usan para analizar la dinámica del agua, cambios en las condiciones que tiene el cauce, diseño de obras hidráulicas y evaluar la respuesta del sistema ante variaciones de caudal.

3.2.1. Simulación estática

Según Chow (1959), el flujo en estado estacionario hace referencia a una condición en la cual las variables hidráulicas no cambian con el tiempo. Bajo este enfoque, el análisis se realiza teniendo en cuenta un equilibrio en el sistema, donde el caudal, la línea de energía y la profundidad se mantienen constantes durante el periodo de estudio. Este tipo de modelación se distingue por su independencia temporal y por facilitar la evaluación de condiciones hidráulicas en canales abiertos.

3.2.2. Simulación de modelos numéricos de flujo no uniforme y no estacionario

Cunge et al. (1980), indica que este modelo sirve para representar flujos en canales donde la profundidad como la velocidad cambian en el espacio y tiempo al igual que en ríos. Esta simulación usa ecuaciones completas de continuidad y momento. Se aplican especialmente en evaluación de riesgos, inundaciones como en la propagación de avenidas.

3.2.3. Modelos no estacionarios

De acuerdo con Rossman (2000), los modelos no estacionarios permiten analizar el comportamiento hidráulico que tiene un sistema en función del tiempo, tomando en cuenta la variación espacial y temporal de las variables de flujo. En esta modelación, los parámetros como el caudal, profundidad y la velocidad no son constantes, sino que varían a lo largo del tiempo y el espacio dentro del sistema hidráulico.

Este enfoque permite la incorporación de condiciones dinámicas en el análisis, lo que favorece la evolución de distintos escenarios hidráulicos bajo variaciones temporales. En cauces naturales y ríos, su aplicación es fundamental para estudios de fenómenos transitorios, como crecidas, ondas de avenida, variaciones de caudal, entre otras.

En consecuencia, los modelos no estacionarios ayudan a representar de manera más realista la evolución del tirante y del perfil de flujo a lo largo de un periodo determinado, siendo una herramienta esencial para el análisis hidráulico de sistemas que están sometidos a condiciones que cambian con el tiempo.

3.2.4. Modelos 1D, 2D y 3D

Los modelos unidimensionales (1D) definen el flujo tomando en cuenta el cambio de las variables hidráulicas particularmente a lo largo de una dirección principal, generalmente el eje del cauce o conducción. Este enfoque se aplica de manera amplia en el análisis de canales y ríos, ya ayuda a estimar variables como el caudal, profundidad y velocidad media en cada sección del sistema. Por otra parte, los modelos bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D), también conocidos como CFD (Computational Fluid Dynamics), permiten analizar de manera detallada las ecuaciones del flujo en dominios hidráulicos que son complejos. Según Versteeg y Malalasekera (2007), estos modelos permiten analizar flujos cercanos a estructuras hidráulicas, procesos de combinación y transporte de material sedimentario y turbulencia.

3.3. Tipos de flujo a modelar

Chow (1959), indica que, en la modelación hidráulica, los tipos de flujos se dividen o se clasifican primordialmente según en cómo cambia sus propiedades en el espacio. Los tres fundamentales son el flujo uniforme, variado y mixto.

3.3.1. Flujo uniforme

Se presenta cuando la velocidad y la profundidad del flujo permanecen constantes a lo largo de la longitud del canal, típicamente en tramos largos y regulares.

3.3.2. Flujo Variado

La profundidad y la velocidad cambian a lo largo del canal, pero este flujo puede ser:

- **Gradualmente variado:** Cambios suaves y progresivos en la profundidad.
- **Rápidamente variado:** Cambios bruscos, como en vertederos, cascadas o resaltes hidráulicos.

3.3.3. Flujo mixto

Este tipo de flujo existe en un mismo sistema en zonas de flujo subcrítico como supercrítico, es decir:

- $Fr < 1 \rightarrow$ Es un flujo subcrítico.
- $Fr > 1 \rightarrow$ Es un flujo supercrítico.

Puede que en cualquier punto ocurra un salto hidráulico. Las características de modelación es en canales que tienen cambios bruscos de pendiente, descargas de presas o en vertederos.

3.4. Softwares para modelación hidráulica

Hay varios softwares para la modelación hidráulica como MIKE 21 / MIKE FLOOD (DHI), SWMM (Storm Water Management Model) y TELEMAC, pero el más utilizado es HEC-RAS que resuelve las ecuaciones de continuidad y momentum (cantidad de movimiento del flujo de agua) en canales abiertos, considerando la fricción y la geometría del canal, para analizar caudales, profundidades y flujos permanentes o no permanentes.

Los programas antes mencionados modelan en 1D, 2D y 3D. El modelamiento 1D es el

que más se usa, ya que es aplicado en gran medida en la modelación hidráulica de canales como de ríos, este modelo ayuda a representar el flujo a lo largo del eje principal del sistema a través de la utilización de valores promedio de las variables hidráulicas, necesitando menor cantidad de datos y un bajo costo computacional (Brunner, 2023).

3.4.1. HEC-RAS

Brunner (2023), menciona que el alcance del software de HEC-RAS permite modelar ríos y canales abiertos, analizar caudales y profundidades, simular inundaciones y considerar la fricción del lecho, siendo útil para el diseño y gestión hidráulica.

3.5 Construcción del modelo hidráulico

Para la modelación hidráulica de los tramos del río Collay y del río Zhío, se usó el software HEC-RAS. Este programa computacional es en gran medida utilizado en estudios hidráulicos debido a la capacidad que tiene el mismo para simular los comportamientos del flujo en canales naturales y ríos a través del cálculo de las expresiones matemáticas de cantidad de movimiento y conservación de masa.

En esta etapa se define todos los parámetros que son esenciales para mostrar de manera adecuada las condiciones físicas como hidráulicas del sistema analizado. Los elementos principales que forman parte en esta configuración es la definición de la geometría que tiene el cauce, el establecimiento de las condiciones de frontera, la incorporación de los caudales que se van a simular y por último la elección del flujo que se va a analizar.

Todos estos elementos ayudan al modelo a simular el comportamiento que tiene el flujo a lo largo del eje principal de los tramos de estudio y calcular las diferentes variables hidráulicas como perfiles de flujo, niveles de agua y velocidades.

3.5.1. Tipo de modelo hidráulico

El análisis hidráulico se realizó a través de un modelo unidimensional (1D) en régimen permanente, es el más utilizado en los estudios hidráulicos de ríos naturales.

Esta modelación considera que el flujo se desarrolla principalmente en la dirección longitudinal del cauce, por lo que los cambios de las variables hidráulicas se examinan a lo largo del eje del río. Esto muestra el comportamiento del flujo utilizando una serie de secciones transversales que muestran la forma que tiene el canal en distintos puntos del tramo de estudio.

El régimen de flujo permanente conlleva que las condiciones hidráulicas del sistema no cambian con el tiempo en la simulación, lo que quiere decir que el caudal se mantiene constante en el análisis, esto es adecuado cuando se busca determinar el perfil de la superficie del agua en caudales específicos.

El uso de un modelo unidimensional (1D) de flujo permanente ayuda a realizar análisis adecuados del comportamiento de los cauces, generando resultados fiables para los niveles de agua.

3.5.2. Geometría del modelo

La geometría que muestra el modelo hidráulico es la configuración de las áreas adyacentes al río dentro del sistema de modelación y la configuración física del cauce. En HEC-RAS la geometría se especifica mediante la incorporación de secciones transversales, las cuales ayudan a describir su ancho, las características del terreno, forma del canal y la profundidad del mismo.

Cada una de sus secciones transversales es un corte perpendicular al eje del río, la cual cuenta con información detallada de las elevaciones que tiene el terreno a lo largo de la sección. Una vez con todas estas secciones transversales, el modelo determina como el flujo se distribuye en el cauce y como cambian las variables hidráulicas a lo largo del tramo analizado.

La geometría del modelo tiene diferentes elementos importantes como:

- Coeficientes de rugosidad de Manning.
- Cotas del terreno.
- Distancia del tramo de estudio.
- Distancia entre las secciones transversales.
- Pendiente longitudinal del cauce.

Estas características son la manera más detallada y sencilla para representar las condiciones físicas del río, lo cual mejora la precisión eficaz de los resultados obtenidos en la simulación hidráulica.

3.5.3. Caudales de simulación

Para desarrollar la modelación hidráulica es fundamental establecer los caudales que se van a utilizar en la simulación.

En estudios hidráulicos, se usan caudales vinculados a distintos periodos de retorno, los mismos representan la magnitud que podría llegar a tener los escenarios hidrológicos que tienen cierta probabilidad de ocurrencia.

Para el presente estudio se adoptan periodos de retorno de 25 y 50 años.

Cada uno de estos nos ayudan a analizar como el río responde ante distintas magnitudes de caudal, lo que favorece identificar las zonas vulnerables distintos escenarios como inundaciones y al análisis que tiene el cauce para transportar estos caudales.

3.5.4. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son parámetros hidráulicos donde se establecen los límites del tramo que se va a modelar y que ayudan al software a obtener las ecuaciones que caracterizan el comportamiento que tiene el flujo en el sistema.

Las condiciones de frontera establecen como entra o sale el agua del tramo del río que se está analizando. Estas condiciones son fundamentales para que el modelo pueda determinar las características hidráulicas del flujo dentro del tramo. En HEC-RAS se toma principalmente dos tipos de condiciones de frontera que se mencionaran más adelante.

3.5.4.1. Condiciones de frontera

En el modelo hidráulico, las condiciones de frontera se definen tanto como aguas arriba como aguas abajo del tramo de estudio. Aguas arriba, se especifica el caudal que entra al sistema que corresponden a los valores definidos para los diferentes periodos de retorno considerados en el análisis. Por otra parte, aguas abajo se establece una condición hidráulica que ayuda a determinar el nivel de agua en ese punto, siendo una de las que más se usan la condición de flujo normal que define a partir de la pendiente de energía o del cauce. Esta consideración ayuda a representar de manera adecuada el comportamiento que tiene el flujo y facilita el cálculo hidráulico a lo largo del tramo analizado.

La pendiente longitudinal del cauce es un parámetro hidráulico que tiene suma importancia en el proceso de modelación, ya que influye de manera directa la energía del sistema, forma del perfil de la superficie del agua y la velocidad del flujo

La pendiente se obtiene a través de la relación entre las diferencias de elevación existentes entre dos puntos del cauce y la distancia horizontal que los delimita, este parámetro estima la inclinación del río y la capacidad para trasladar agua. La pendiente se usa en el modelo hidráulicos para definir la pendiente del flujo o de energía, la cual interviene en la obtención de los cálculos hidráulicos que hace el software para determinar los niveles de agua y las profundidades del flujo.

A continuación, se muestra los parámetros hidráulicos empleados para la definición de la pendiente de energía y las condiciones de frontera de los ríos Collay y Zhío respectivamente:

Tabla 3-1. Parámetros hidráulicos usados para la definición del río Collay

Parámetros	Valor
Longitud del cauce principal	24.82 km
Desnivel del cauce	1,065 m
Pendiente longitudinal máxima del cauce	0.098 m/m
Tipo de flujo considerado	Flujo permanente
Régimen de flujo considerado	Flujo mixto
Uso en la modelación	Condición de frontera aguas abajo en HEC – RAS

Fuente: Autores

Tabla 3-2. Parámetros hidráulicos usados para la definición del río Zhió

Parámetro / Criterio	Valor
Longitud del cauce principal	14.79 km
Desnivel del cauce	1,039 m
Pendiente media estimada del cauce	0.070 m/m
Tipo de flujo considerado	Flujo permanente
Régimen de flujo considerado	Flujo mixto
Uso en la modelación	Condición de frontera aguas abajo en HEC – RAS

Fuente: Autores

3.6. Información base para modelación hidráulica

A continuación, se presenta una tabla con todos los valores del coeficiente de rugosidad de Manning n recopilados en el capítulo anterior. Estos datos se obtuvieron a partir de las a partir de las formulaciones descritas por diferentes autores y la revisión de literatura. La tabla ayuda a comparar los valores propuestos según el tipo de formulación aplicada y las condiciones hidráulicas determinadas, permitiendo así la identificación de rangos representativos del coeficiente de rugosidad para el caso de estudio:

Tabla 3-3. Resumen de los valores de “n” de todos los autores basados en literatura, formulación granulométrica, parámetros hidráulicos y tablas respectivamente

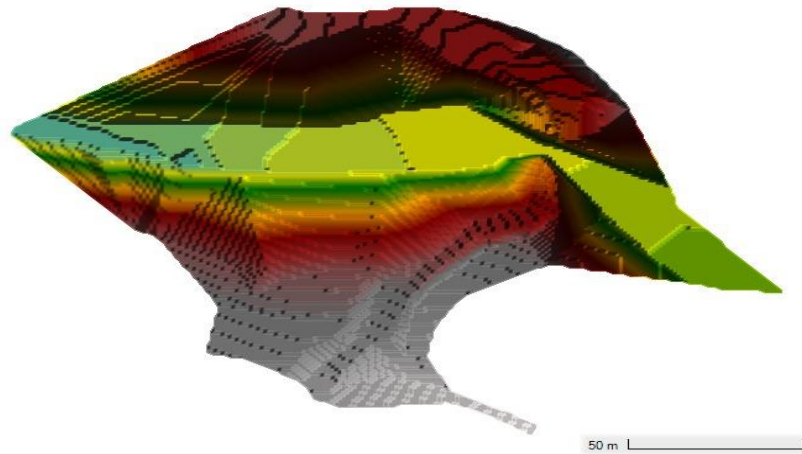
Autores	Río Collay (n)	Río Zhío (n)
Timbe et al. (2022)	0.035	0.035
Díaz-Salas et al. (2020)	0.042	0.042
Solano & Martínez (2020)	0.031- 0.073	0.031- 0.073
Fernandez de Córdova et al. (2020)	0.055	0.055
Simons & Sentürk (1977)	0.0161	0.0137
Lane & Carlson (1953)	0.040	0.0356
Brater & King (1976)	0.037	0.037
Jarret (1984)	0.075	0.0736
Yen (1992)	0.1032	0.104
Cowan (1956)	0.048	0.058

Fuente: Autores

3.7. Construcción del modelo hidráulico

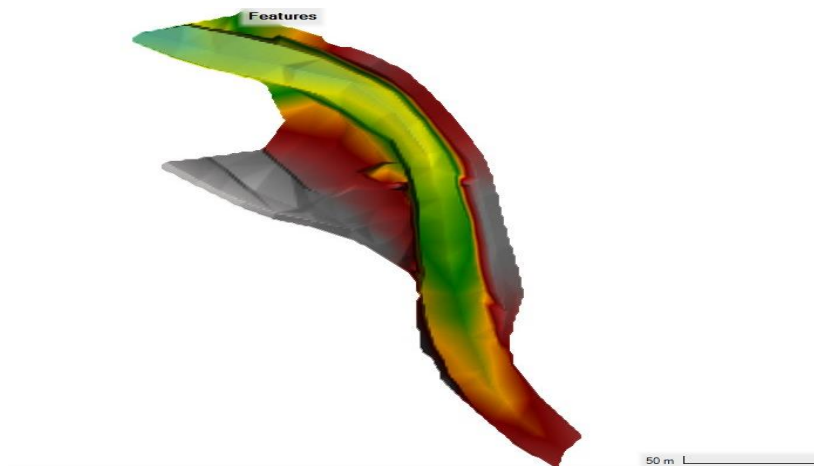
El modelo hidráulico fue construido a partir del Modelo Digital de Terreno (MDT) obtenido con la información topográfica levantada en campo, utilizado como base para definir las geometrías de los cauces.

Figura 3-1: Modelo hidráulico del río Collay



Fuente: Autores

Figura 3-2: Modelo hidráulico del río Zhío



Fuente: Autores

3.8. Comparación de resultados

Los coeficientes de Manning a emplear ya fueron descritos anteriormente en el apartado 3.6. En base a ello, se debe clasificar en valores altos, medios y bajos. Por ejemplo, valores altos son de autores como Yen y Jarret, valores medios de Díaz-Salas y Cowan mientras que valores bajos corresponden a Simons y Timbe, esto valores se pueden observar en la tabla 3-3.

A continuación, se muestra los resultados de la comparación de los parámetros hidráulicos con los números de Manning “n” de todos los autores del río Collay y Zhío:

Tabla 3-4. Comparación de los parámetros hidráulicos con los números de Manning “n” de todos los autores del río Collay

Autores	N	Velocidad				Tirante				Energía Total			
		25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años
		MIN	MIN	MAX	MAX	MIN	MIN	MAX	MAX	MIN	MIN	MAX	MAX
Timbe	0.035	1.23	1.25	5.46	5.92	0.6	0.63	2.41	2.72	2277.2	2277.4	2282	2282.49
Salas	0.042	1.22	1.24	5.09	5.55	0.63	0.66	2.43	2.73	2277.2	2277.4	2282	2282.50
Solano	0.052	1.2	1.23	4.71	5.22	0.66	0.69	2.45	2.75	2277.2	2277.4	2282	2282.53
Fernández	0.055	1.19	1.23	4.52	5.04	0.68	0.7	2.46	2.75	2277.2	2277.4	2282	2282.54
Simons	0.0161	1.25	1.27	7.07	7.45	0.53	0.57	2.39	2.69	2278.1	2278.4	2282	2282.46
Lane	0.04	1.22	1.25	5.19	5.65	0.62	0.65	2.42	2.72	2277.2	2277.4	2282	2282.50
Brater	0.037	1.23	1.25	5.34	5.81	0.61	0.64	2.42	2.72	2277.2	2277.4	2282	2282.49
Jarret	0.075	1.12	1.16	4.21	4.44	0.87	0.87	2.6	2.88	2277.3	2277.5	2282	2282.67
Yen	0.1032	1.02	1.07	4.16	4.44	1.18	1.29	2.79	3.09	2277.5	2277.7	2283	2282.90
Cowan	0.048	1.21	1.24	4.96	5.28	0.64	0.68	2.44	2.74	2277.2	2277.4	2282	2282.50

Fuente: Autores

De la Tabla 3-4 correspondiente al río Collay, se observa que los valores bajos de “n” menor a 0.04 del coeficiente de Manning producen velocidades mayores y tirantes menores, evidenciando un flujo rápido con menor profundidad. Por otra parte, los valores altos de “n” mayor a 0.07 generan velocidades menores y tirantes mayores, lo que refleja un flujo lento y profundo. Los valores intermedios de rugosidad de $0.04 \leq n \leq 0.055$ tienen un comportamiento estable, con cambios moderados en los parámetros hidráulicos, por lo que representan de manera más equilibrada las condiciones del cauce. En los periodos de retorno entre 25 y 50 años, ocurre cambios pequeños en los parámetros hidráulicos, conservando un comportamiento estable del flujo.

Tabla 3-5. Comparación de los parámetros hidráulicos con los números de Manning “n” de todos los autores del río Zhío

Autores	N	Velocidad				Tirante				Energía Total			
		25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años
		MIN	MIN	MAX	MAX	MIN	MIN	MAX	MAX	MIN	MIN	MAX	MAX
Timbe	0.035	2.69	2.78	4.84	4.53	1.04	1.10	1.76	1.88	2377.3	2377.39	2381.76	2381.54
Salas	0.042	2.52	2.62	4.84	4.11	1.08	1.26	1.85	1.99	2377.3	2377.42	2381.76	2381.48
Solano	0.052	2.35	2.41	4.84	3.82	1.08	1.40	1.95	2.10	2377.3	2377.40	2381.76	2381.46
Fernández	0.055	2.27	2.34	4.84	3.69	1.08	1.43	1.98	2.12	2377.3	2377.41	2381.76	2381.46
Simons	0.0137	6.19	6.49	7.15	7.47	0.61	0.65	1.16	1.23	2378.39	2378.65	2382.53	2382.76
Lane	0.0356	2.67	2.76	4.84	4.50	1.05	1.11	1.76	1.88	2377.3	2377.39	2381.76	2381.53
Brater	0.037	2.63	2.73	4.84	4.43	1.07	1.13	1.76	1.88	2377.3	2377.39	2381.76	2381.52
Jarret	0.0736	1.91	1.95	4.84	3.06	1.08	1.65	2.19	2.32	2377.38	2377.49	2381.76	2381.50
Yen	0.1040	1.48	1.52	2.35	2.46	1.84	1.95	2.53	2.68	2377.57	2377.69	2381.57	2381.69
Cowan	0.058	2.20	2.27	4.84	3.56	1.08	1.47	2.01	2.15	2377.31	2377.42	2381.76	2381.46

Fuente: Autores

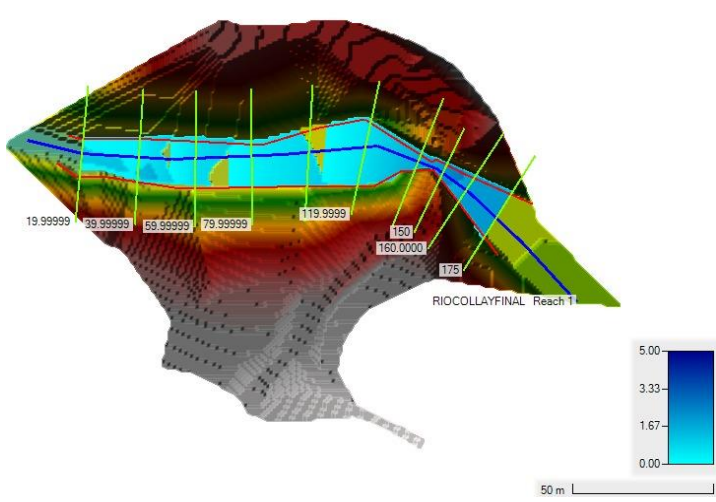
De la Tabla 3-5 correspondiente al río Zhío, se mira una tendencia parecida, donde los coeficientes de Manning bajos de “n” menor a 0.04 generan velocidades mayores y tirantes menores, mientras que los valores altos de “n” mayor a 0.07 generan una disminución de la velocidad y un incremento del tirante. Los valores intermedios de $0.04 \leq n \leq 0.055$ indican un comportamiento uniforme y consistente en los parámetros hidráulicos, reflejando de mejor manera las condiciones del flujo en el cauce analizado. En los periodos de retorno de 25 y 50 años, hay un incremento moderado en los parámetros hidráulicos, reflejando una respuesta progresiva del flujo ante caudales mayores.

3.8.1. Resultados gráficos

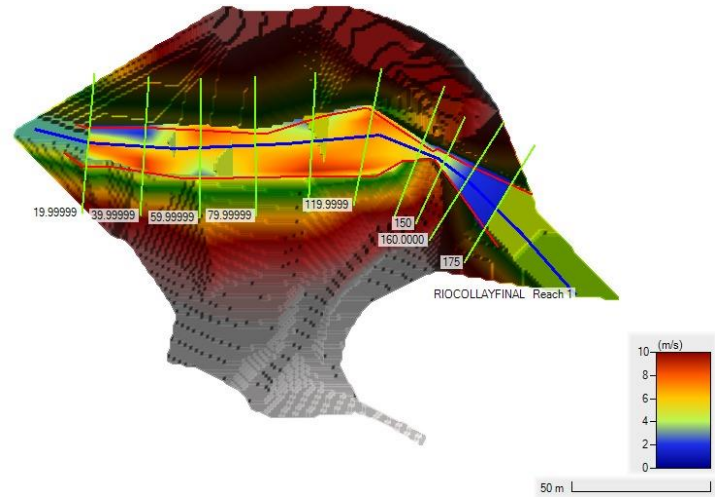
3.8.1.1. Río Collay

Se modeló el tramo del río Collay con los criterios hidráulicos especificados en la tabla 3-3. A continuación, se presenta de manera gráfica los resultados de profundidad y velocidad para el caso de rugosidad mínima de Simons ($n = 0.016$), media de Salas ($n = 0.042$) y máxima de Yen ($n = 0.1032$) respectivamente:

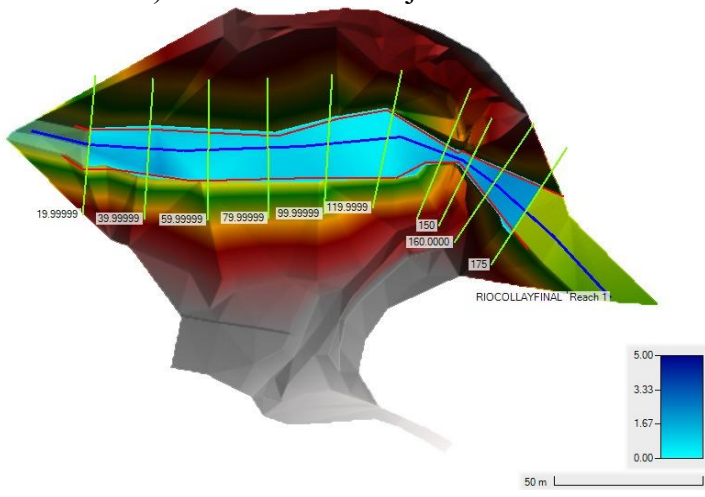
Figura 3-3: Resultados de la modelación hidráulica para el río Collay



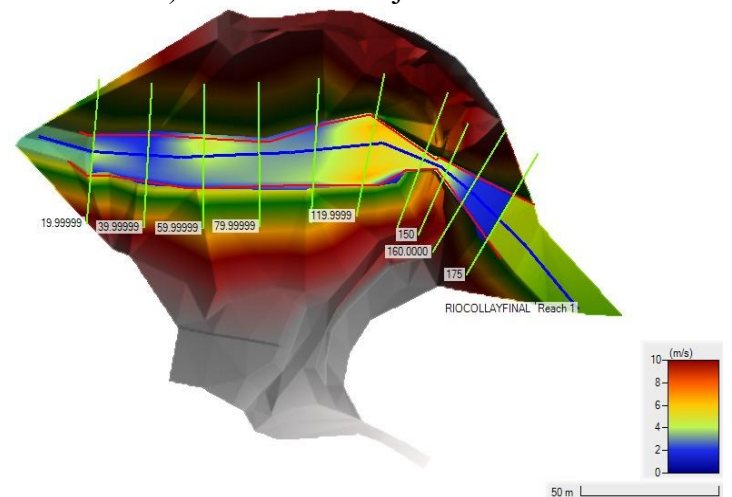
a) Profundidad n baja



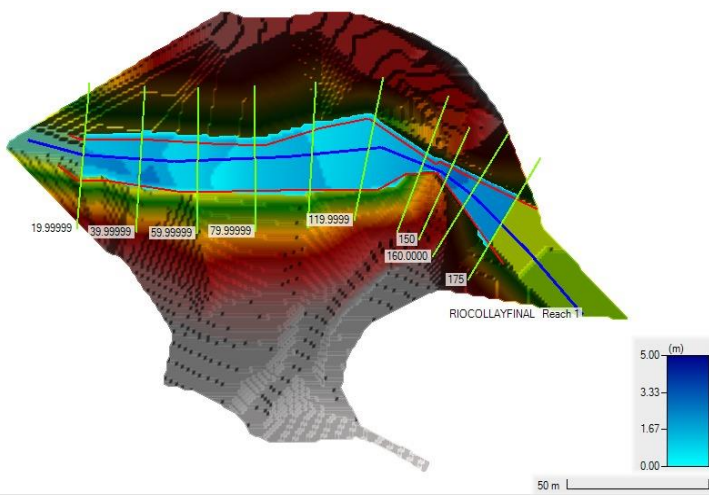
b) Velocidad n baja



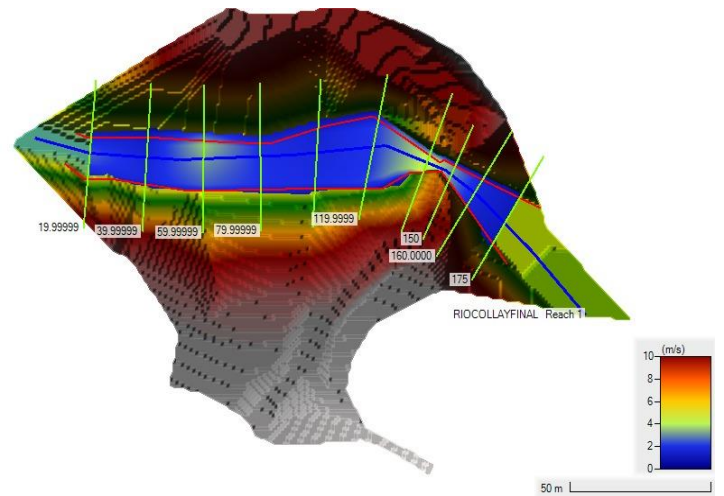
c) Profundidad n media



d) Velocidad n media



e) Profundidad n máx



f) Velocidad n máx

Fuente: Autores

En la figura 3-3, las figuras correspondientes al río Collay se observa el efecto que tiene el coeficiente de Manning “n” sobre la lámina de agua y la velocidad del flujo. Cuando el valor de “n” es pequeño como en el caso de Simons, la rugosidad del cauce menor, lo que facilita que el flujo llegue a mayores velocidades. En si la lámina de agua es pequeña.

En los casos de Salas y Yen el coeficiente de Manning incrementa, la rugosidad del cauce aumenta provocando una resistencia alta al flujo. Lo mismo genera una disminución en la velocidad del agua, la cual equilibra con un aumento en la lámina de agua para que el caudal siga constante.

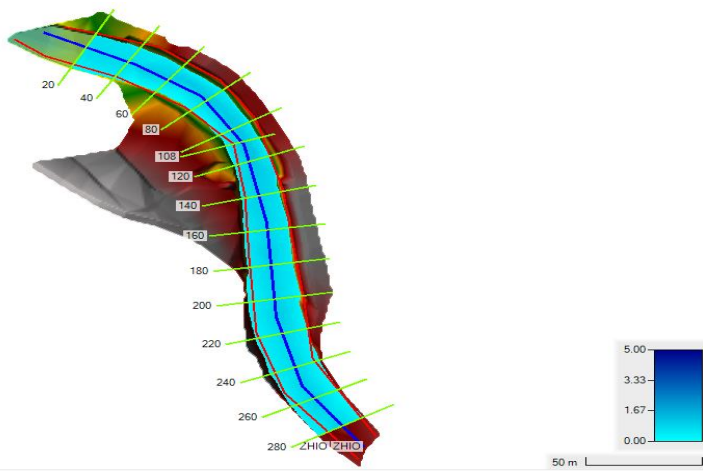
El río Collay manifiesta de manera clara una relación inversa entre el coeficiente de Manning y la velocidad y una relación directa entre el coeficiente “n” y la lámina de agua, resaltando la influencia que tiene la rugosidad con el comportamiento hidráulico del río.

3.8.1.2. Río Zhío

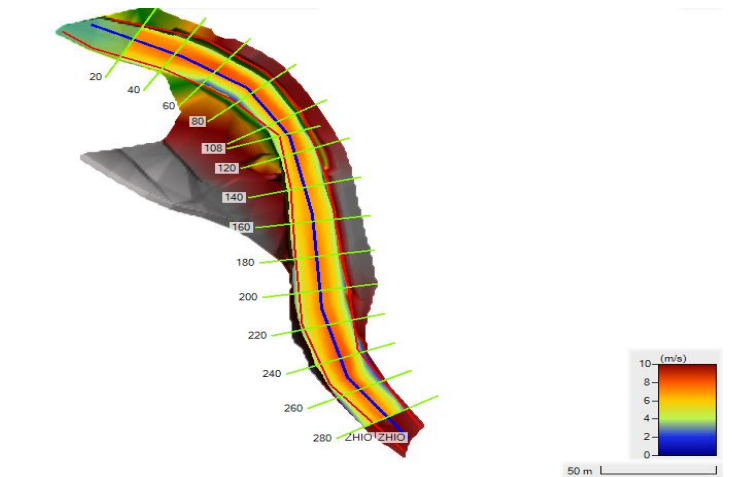
Se modelo el tramo del río Collay con los criterios hidráulicos especificados en la tabla 3-3.

A continuación, se presenta de manera grafica los resultados de profundidad y velocidad para el caso de rugosidad mínima de Simons ($n = 0.0137$), media de Salas ($n = 0.042$) y máxima de Yen ($n = 0.104$) respectivamente:

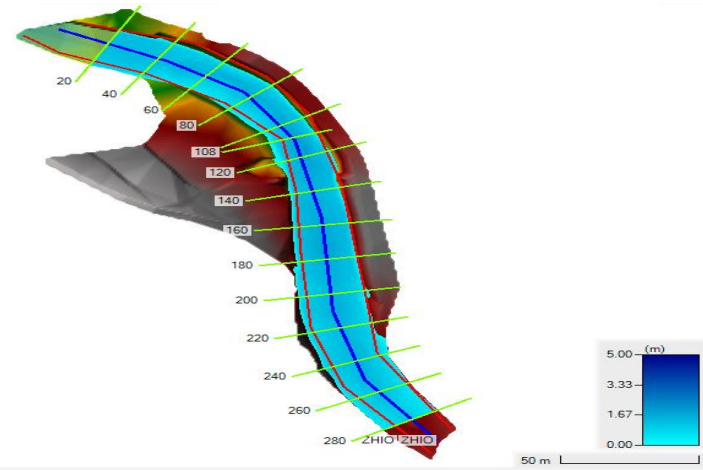
Figura 3-4: Resultados de la modelación hidráulica para el río Zhío



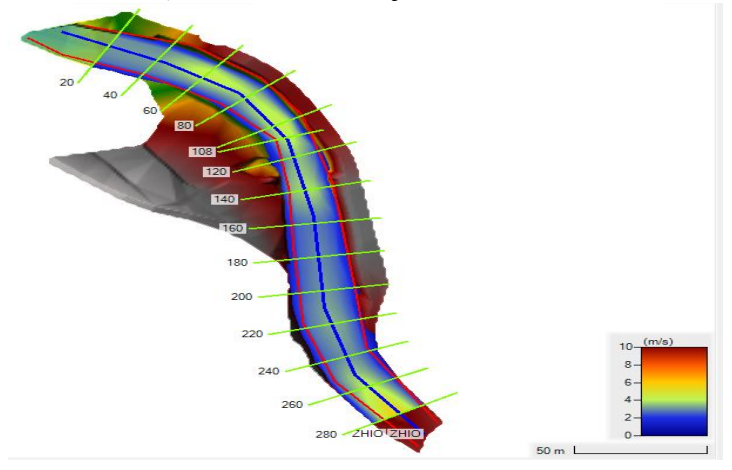
a) Profundidad n baja



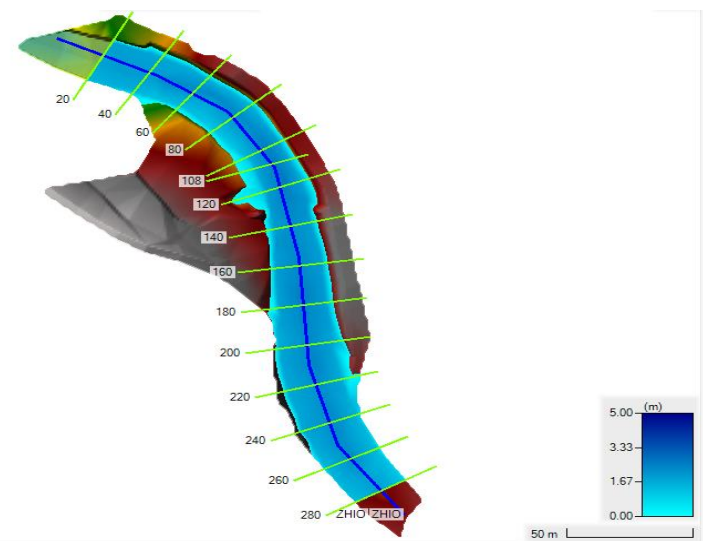
b) Velocidad n baja



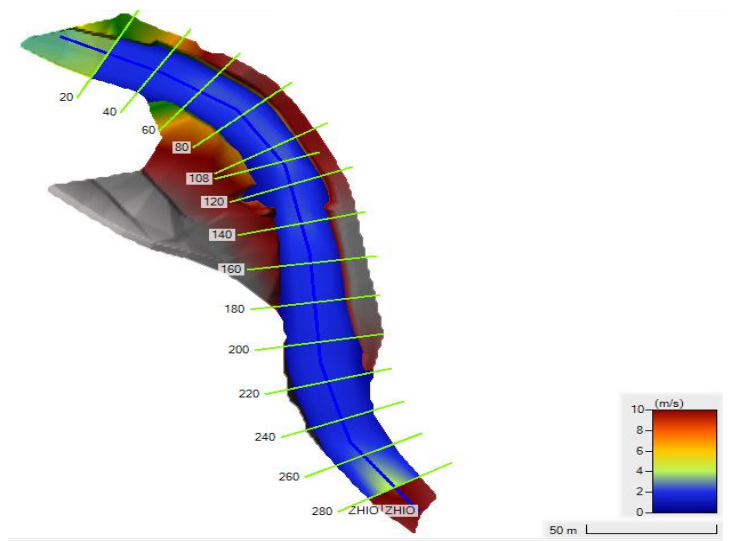
c) Profundidad n media



d) Velocidad n media



e) Profundidad n máx



f) Velocidad n máx

Fuente: Autores

En la figura 3-4, las figuras correspondientes al río Zhío tienen un comportamiento muy similar respecto al coeficiente de Manning “n”. Valores bajos de “n”, como es en el caso de Simons, la rugosidad del cauce menor beneficia mayores velocidades del flujo, lo que convierte a la lámina de agua en menor altura.

Cuando el coeficiente “n” incrementa, como en los casos de Salas y Yen respectivamente, la rugosidad del cauce aumenta, provocando una mayor resistencia al flujo. Esto disminuye la velocidad del agua y produce un incremento en la lámina de agua para mantener constante el caudal.

La tendencia así sea la misma del río Collay, el río Zhío tiene algunos ligeros cambios por la geometría del cauce. Sin embargo, la relación inversa entre el coeficiente de Manning y la velocidad, así mismo como la relación directa que tiene “n” y la lámina de agua, destaca la elección de un coeficiente adecuado en modelaciones hidráulicas.

3.9. Análisis de sensibilidad por variable

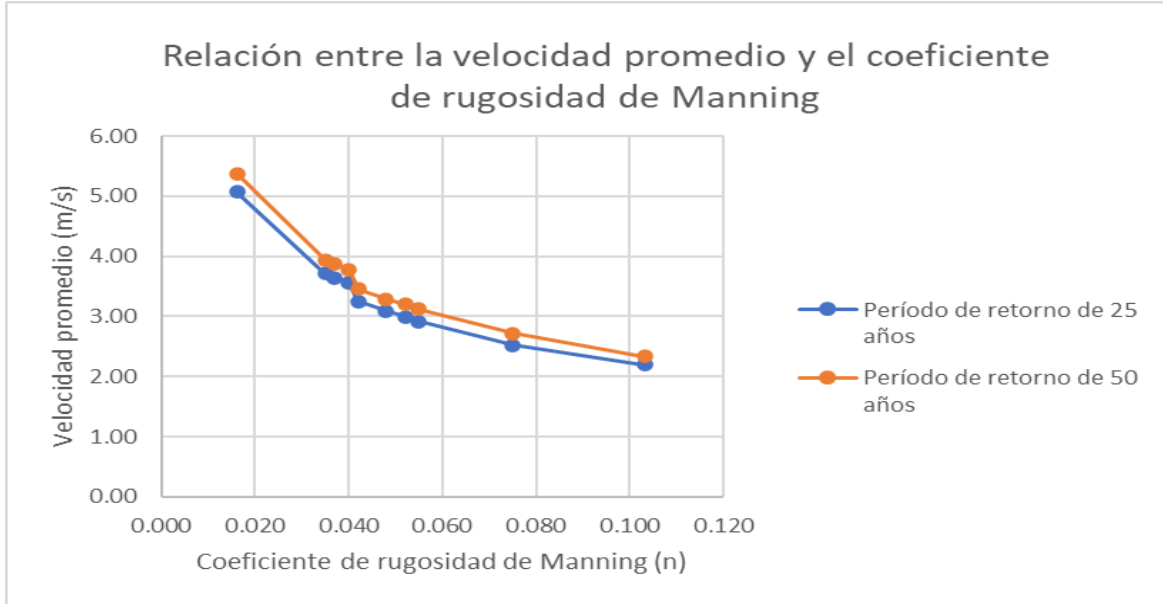
La sensibilidad en variables hace referencia en qué medida varían los resultados hidráulicos, como la lámina de agua o velocidad, cuando se cambia una variable de entrada, en el caso el coeficiente de Manning. Si se cambia la variable de entrada y se produce variaciones altas en los resultados, existe una alta sensibilidad; Por otra parte, si la variación es pequeña, la sensibilidad es baja. Conocer la sensibilidad de los parámetros es importante porque ayuda a identificar los cuales influyen más en el comportamiento del flujo y deben ser definidos con mayor precisión en el análisis hidráulico.

Un gráfico de sensibilidad es una herramienta que indica como cambian los resultados de un modelo cuando varia sus parámetros de entrada. Permite determinar que variables influyen más en el comportamiento que tiene el sistema.

3.9.1. Collay

A continuación, se muestra los resultados de sensibilidad por variables del río Collay:

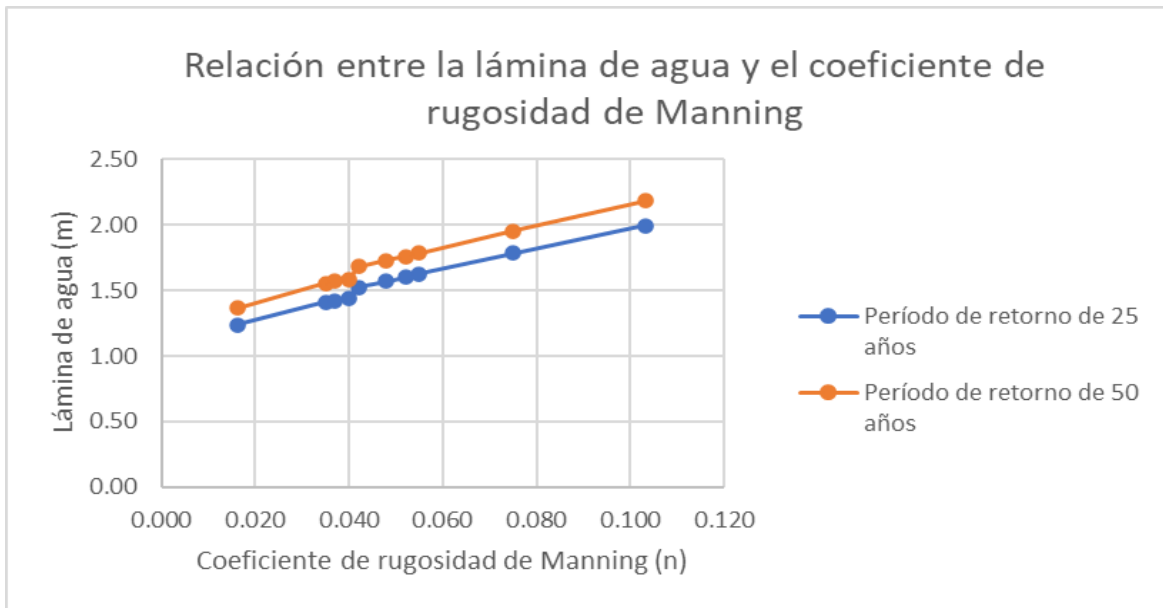
Figura 3-5: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Collay de la velocidad promedio y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años



Fuente: Autores

La velocidad promedio en la figura 3-5, muestra una tendencia baja a medida que el número de Manning incrementa, mostrando una relación no lineal. Esto es debido a que, a mayor rugosidad, crece la resistencia al flujo, disminuyendo su capacidad de desplazamiento. En cuanto al efecto del periodo de retorno, en el periodo de 50 años se obtienen velocidades superiores en comparación al periodo de 25 años, este comportamiento se debe principalmente al aumento del caudal; sin embargo, en ambos casos persiste una tendencia decreciente.

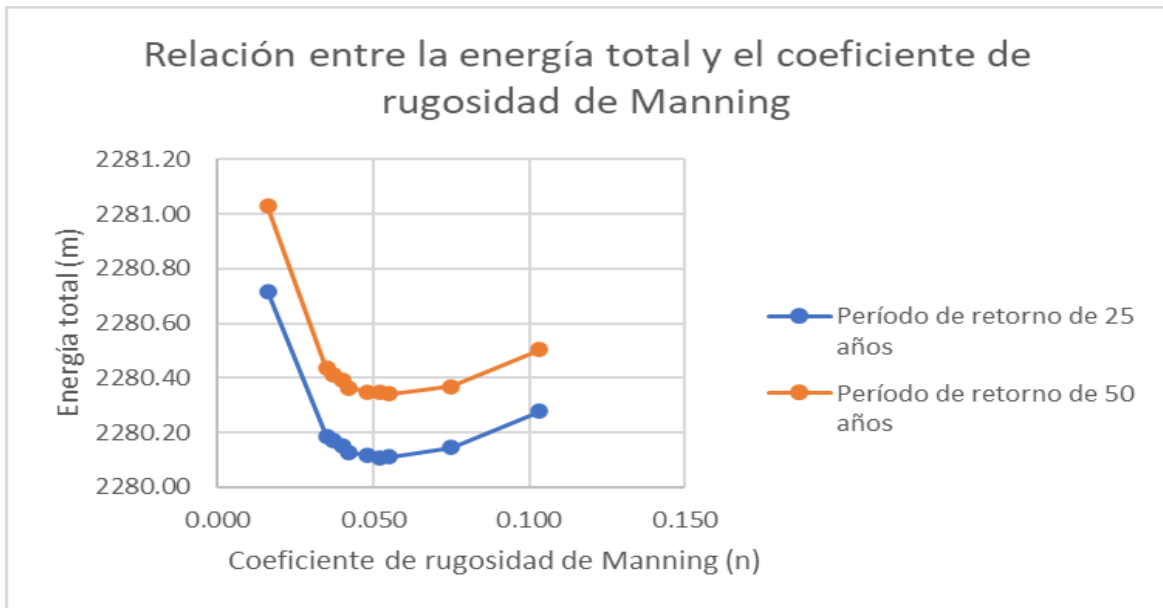
Figura 3-6: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Collay de la lámina de agua promedio y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años



Fuente: Autores

La lámina de agua en la figura 3-6, tiene un comportamiento creciente en comparación al incremento del coeficiente de Manning. Este comportamiento se explica porque al incremento de la rugosidad hidráulica, representada por el coeficiente de Manning, provoca pérdidas de energía mayores por fricción, lo que impone al flujo a aumentar el tirante hidráulico para conservar la capacidad de transporte de caudal según la ecuación de Manning. En cuanto al periodo de retorno, el periodo de 50 años tiene valores superiores al de 25 años debido al caudal de diseño mayor, lo que hay un aumento en la energía de flujo y por lo tanto mayores profundidades para conservar las condiciones hidráulicas de manera adecuada.

Figura 3-7: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Collay de la energía total promedio y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años



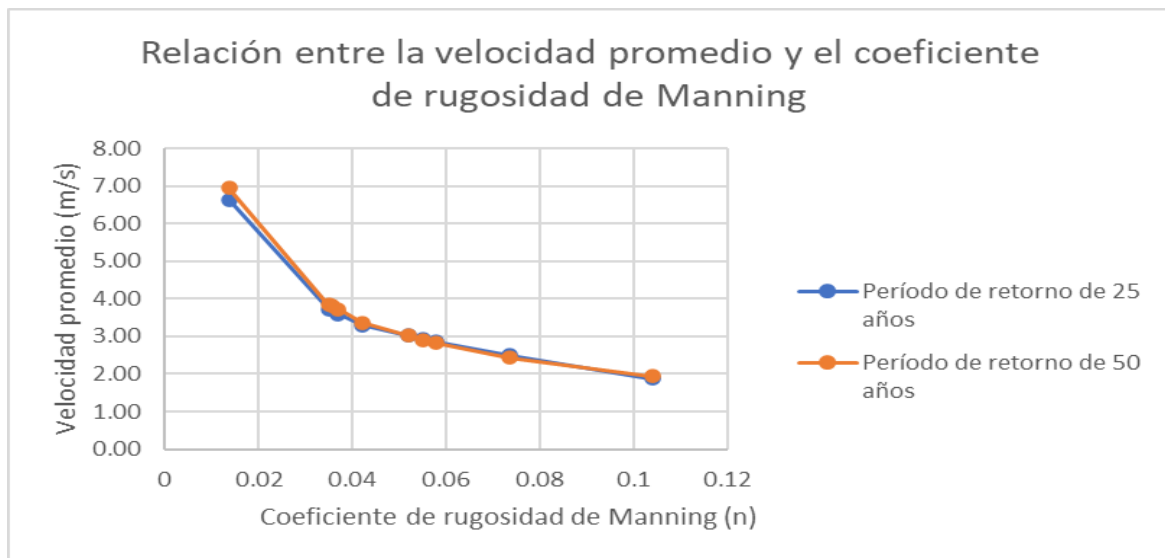
Fuente: Autores

La energía total de la figura 3-7, disminuye al incremento del coeficiente de Manning, debido a la disminución de la energía por la velocidad menor del flujo; sin embargo, a partir de cierto valor de “n”, comienza a elevarse por el aumento del tirante, que eleva a la energía potencial y supera la disminución de la componente cinética. De tal manera para el periodo de 50 años se adquiere valores mayores de energía total en comparación al de 25 años, debido al caudal mayor y a los tirantes mayores.

3.9.2. Zhío

A continuación, se muestra los resultados de sensibilidad por variables del río Zhío:

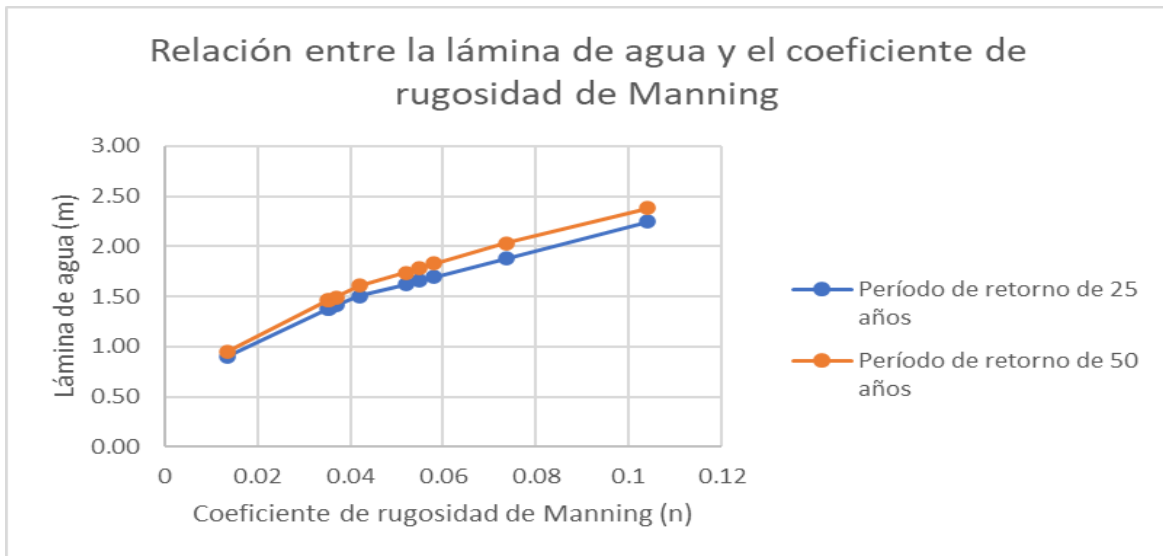
Figura 3-8: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Zhío de la velocidad promedio y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años



Fuente: Autores

En el río Zhío la figura 3-8, muestra que la velocidad promedio baja al aumentar el coeficiente de Manning, debido al efecto que tiene la rugosidad en la disipación de energía del flujo; al comparar los periodos de retorno de 25 y 50 años, se mira que los valores de velocidad son ligeramente superiores para el periodo de 50 años que están vinculados al mayor caudal. Sin embargo, las diferencias que hay entre ambos ríos es menor, ya que la geometría de cauce y las condiciones hidráulicas limitan cambios significativos en la velocidad, manteniéndose iguales en ambos casos.

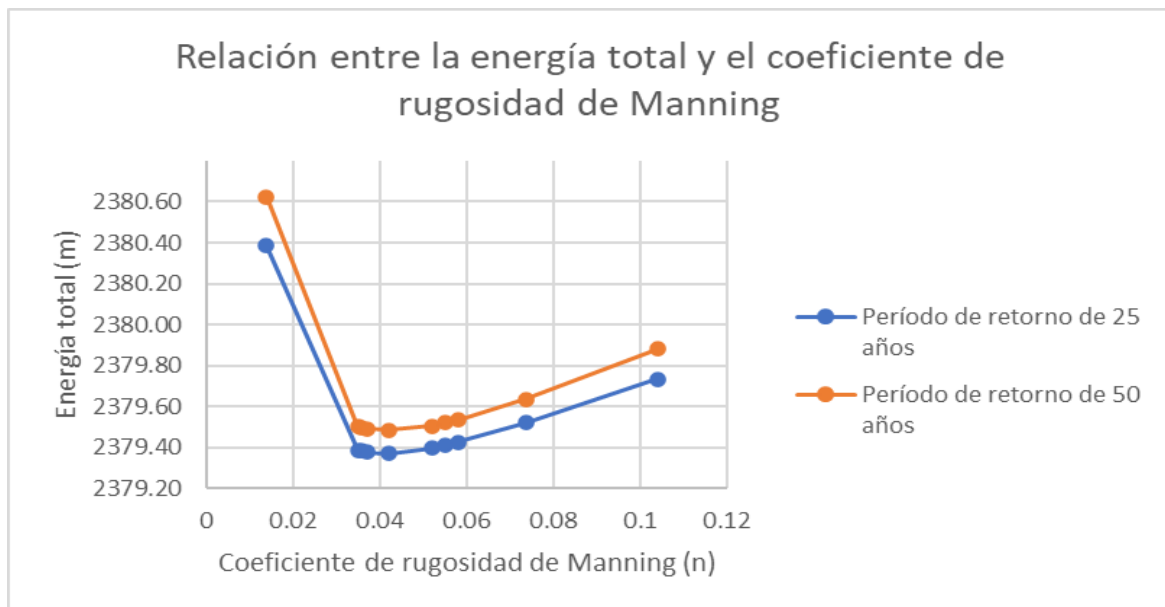
Figura 3-9: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Zhío de la lámina de agua y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años



Fuente: Autores

La lámina de agua de la figura 3-9, aumenta conforme se incrementa el coeficiente de Manning, lo cual señala que, ante mayores condiciones de rugosidad, el flujo requiere un mayor tirante para trasladar el caudal, contrarrestando la pérdida de capacidad hidráulica a través de un incremento en la profundidad. En cuanto en el periodo de retorno de 50 años hay valores mayores de tirante en respecto al de 25 años, debido al mayor caudal de diseño, lo que requiere una sección hidráulica mayor para su conducción.

Figura 3-10: Gráfica de la sensibilidad por variable del río Zhío de la energía total y el número de Manning en periodos de 25 años y 50 años



Fuente: Autores

La energía total en la figura 3-10, aumenta con el incremento del coeficiente de Manning, ya que el incremento del tirante sube la energía potencial, dominando sobre la disminución de la energía cinética vinculada a la menor velocidad del flujo; este comportamiento refleja el efecto de la rugosidad en la redistribución de la energía del sistema. En cuanto a los periodos de retorno el de 50 años presenta valores superiores al de 25 años, debido al mayor caudal, que provoca mayores profundidades y un incremento de la energía total.

Por otro lado, el río Collay como el río Zhío, el aumento del coeficiente de Manning provoca una disminución de la velocidad del flujo y un incremento del tirante y de la energía total, como consecuencia del efecto que tiene la rugosidad sobre la resistencia hidráulica y la redistribución de la energía. El incremento del periodo de retorno a 50 años amplifica los valores de estas variables debido al mayor caudal asociado, sin cambiar la tendencia observada. Esto afirma que el caudal y la rugosidad son parámetros fundamentales en la respuesta hidráulica del flujo.

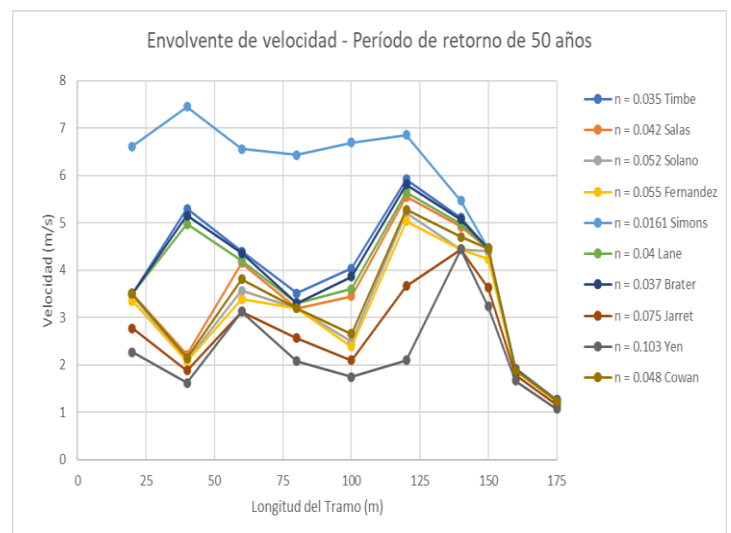
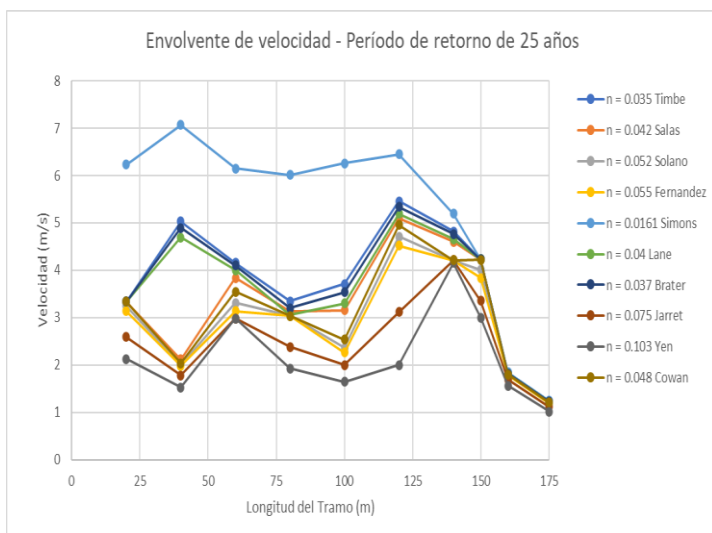
3.10. Análisis de los perfiles longitudinales

Un perfil longitudinal es una descripción gráfica que indica la variación del valor de un parámetro hidráulico con respecto al desarrollo longitudinal del tramo modelado. Esta representación gráfica ayuda a visualizar de manera correcta el comportamiento del flujo y la pendiente a lo largo del tramo analizado, facilitando interpretar los resultados hidráulicos.

3.10.1. Río Collay

A continuación, se muestra los resultados de los perfiles longitudinales del río Collay:

Figura 3-11: Gráfica de la envolvente del río Collay de la velocidad y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años



a) Período de retorno 25 años

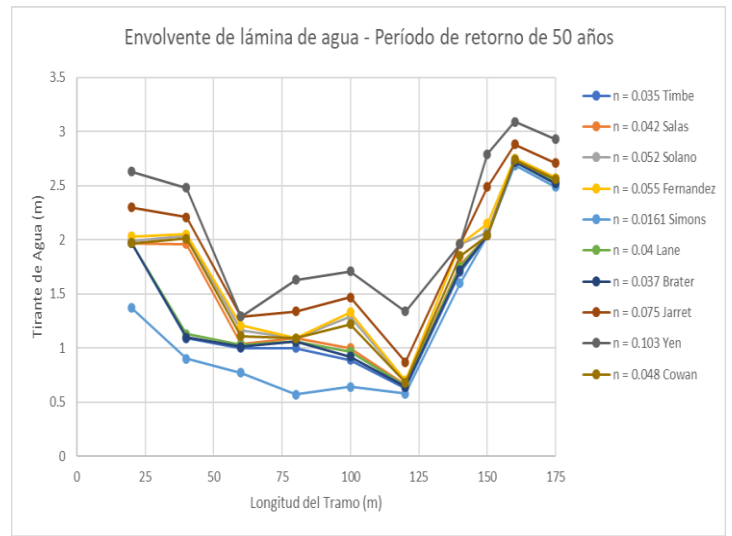
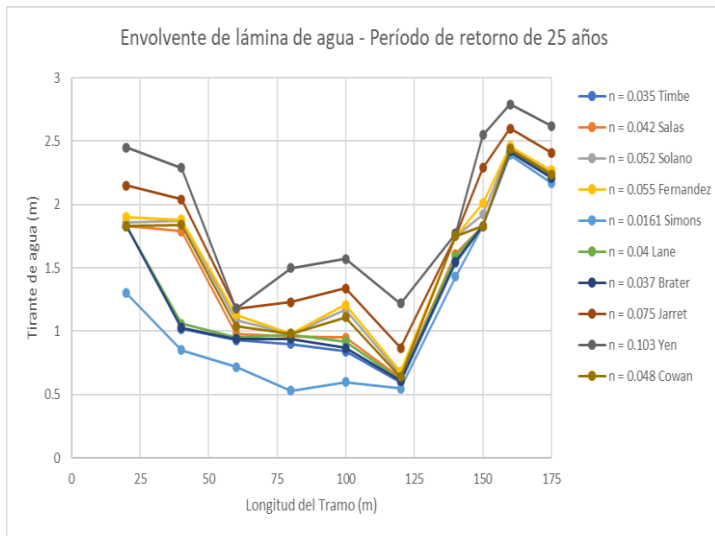
b) Período de retorno 50 años

Fuente: Autores

En la envolvente de velocidades a lo largo del tramo, la velocidad tiene variaciones vinculadas a las condiciones hidráulicas y geométricas del cauce. En estos gráficos, se mira que los perfiles correspondientes a los periodos de retorno de 25 y 50 años tienden a estar cerca en ciertos sectores, lo cual se explica por la disipación de energía debido a la fricción, que disminuye las diferencias entre los valores límites de velocidad. Sin embargo, en otros tramos las curvas no son iguales, debido a los cambios en el ancho y

la geometría de la sección transversal, lo que provoca ajustes locales en la distribución de velocidades. Por otra parte, en la comparación entre periodos de retorno, se evidencia que el período de retorno de 50 años de la figura 3-11, literal b) de 50 años tiene velocidades mayores respecto a la figura del literal b) de 25 años, como consecuencia del mayor caudal que fluye por el cauce.

Figura 3-12: Gráfica de la envolvente del río Collay de la lámina de agua y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años



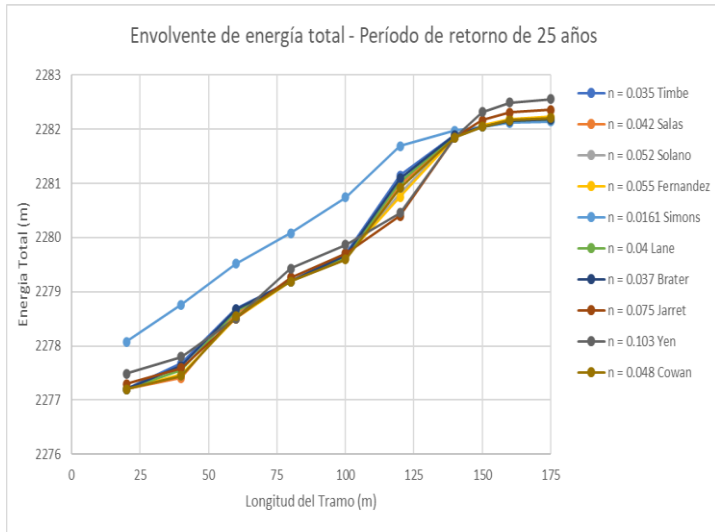
a) Período de retorno 25 años

b) Período de retorno 50 años

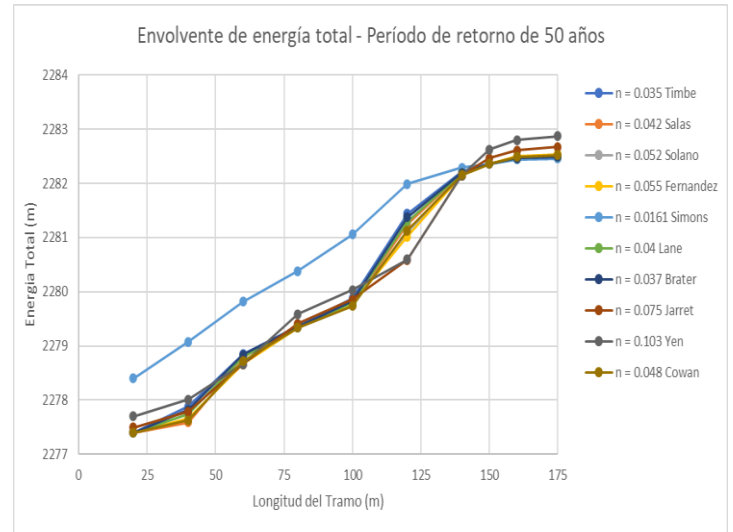
Fuente: Autores

En la envolvente de tirantes a lo largo del tramo, se mira que los perfiles correspondientes a los periodos de retorno de 25 y 50 años tienden a coincidir en ciertos puntos específicos, debido a la disipación de energía por fricción que existe, la cual disminuye los cambios entre ambos escenarios. No obstante, en zonas donde se presentan cambios en el ancho hidráulico, las curvas muestran espaciamentos, evidenciando efectos locales asociados a cambios en la geometría del cauce. En general, el periodo de retorno de la figura 3-12, literal b) de 50 años tiene tirantes mayores en comparación con el literal a) de 25 años, como resultado del aumento del caudal que es conducido por la sección.

Figura 3-13: Gráfica de la envolvente del río Collay de la energía total y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años



a) Período de retorno 25 años



b) Período de retorno 50 años

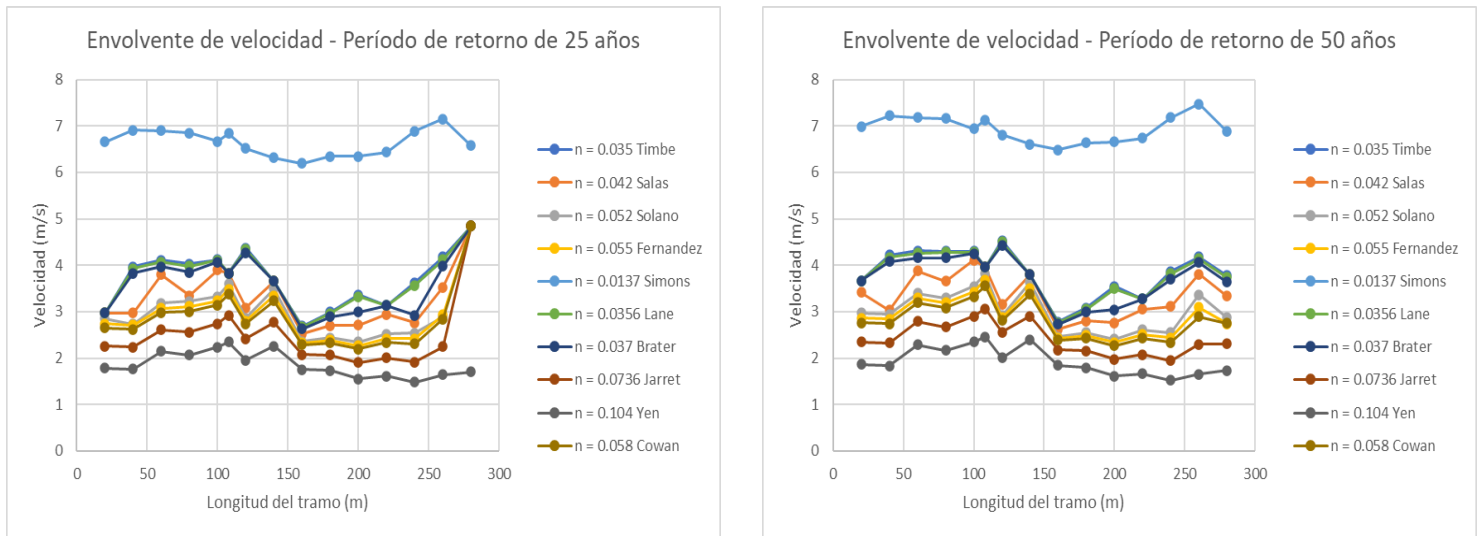
Fuente: Autores

En las envolventes de energía total a lo largo del tramo, se mira que los perfiles correspondientes a los periodos de retorno de 25 y 50 años coinciden en algunas zonas específicas, lo cual hace referencia por la disipación de energía que existe debido a la fricción, que disminuye las diferencias entre ambos escenarios. Sin embargo, en tramos donde se presentan cambios en el ancho y la geometría de la sección, las curvas muestran espaciamientos, evidenciando efectos locales en la distribución de la energía. En términos generales, el periodo de retorno de 50 años de la figura 3-13, literal b) de 50 años presenta valores mayores de energía total respecto al del literal a) de 25 años, como consecuencia del mayor caudal y de los tirantes mayores asociados.

3.10.2. Río Zhío

A continuación, se muestra los resultados de los perfiles longitudinales del río Zhío:

Figura 3-14: Gráfica de la envolvente del río Zhío de la velocidad y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años



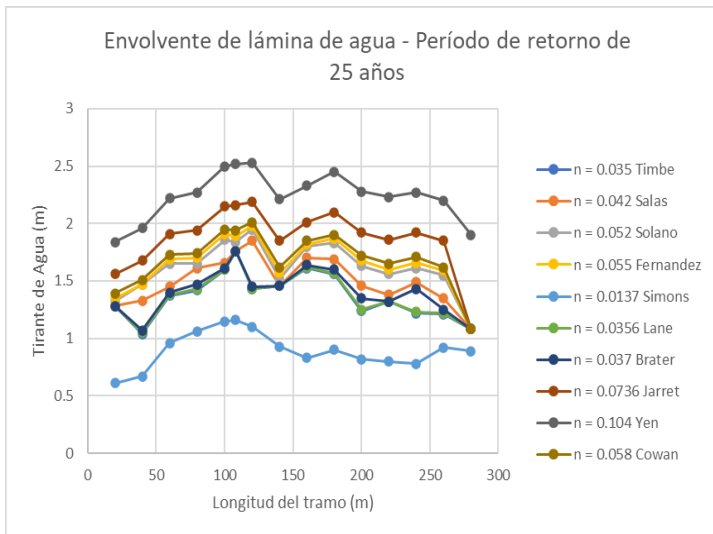
a) Período de retorno 25 años

b) Período de retorno 50 años

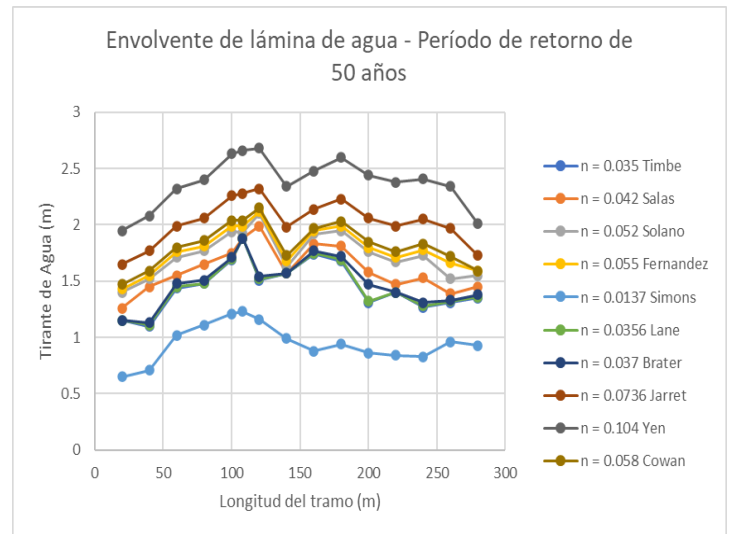
Fuente: Autores

En la envolvente de velocidades a lo largo del tramo, se mira que los perfiles que corresponden a los periodos de retorno de 25 y 50 años no coinciden, manteniendo una separación a lo largo de todo el tramo. Este comportamiento muestra que, a diferencia de otros casos, la disipación de energía por fricción no es suficiente para disminuir progresivamente las diferencias entre ambos escenarios, ni hay efectos locales significativos vinculados a cambios en la geometría del cauce. En términos generales, el periodo de retorno de 50 años de la figura 3-14, literal b) tiene velocidades mayores respecto al del literal a) de 25 años, teniendo el mismo comportamiento a lo largo del tramo, como consecuencia del mayor caudal que fluye.

Figura 3-15: Gráfica de la envolvente del río Zhío de la lámina de agua y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años



a) Período de retorno 25 años

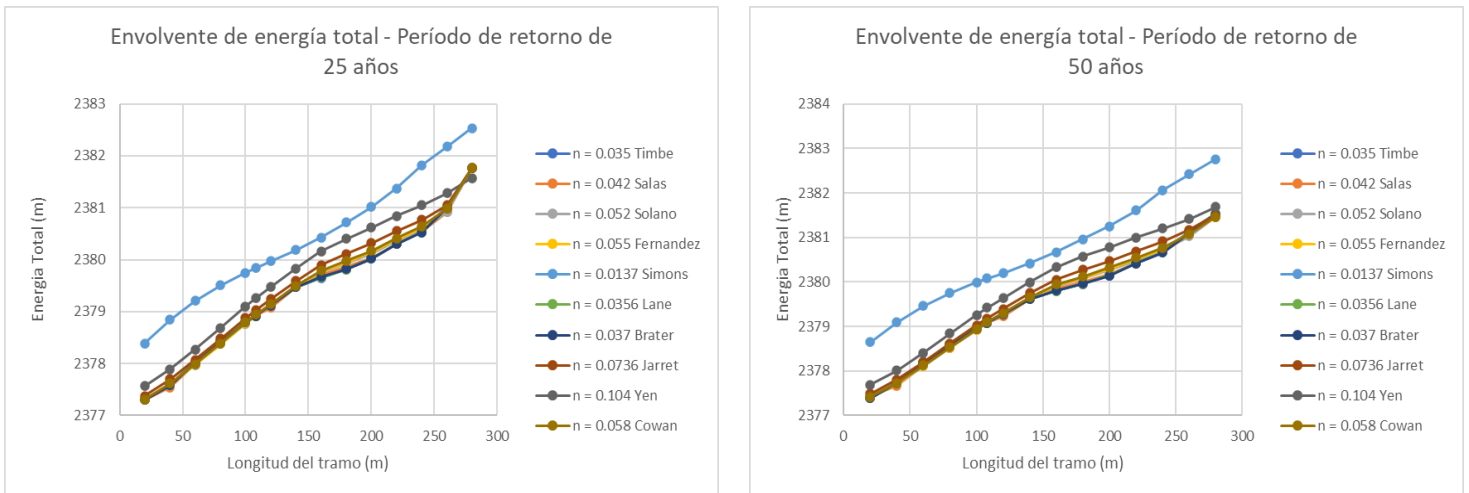


b) Período de retorno 50 años

Fuente: Autores

En la envolvente de tirantes a lo largo del tramo, se observa que los perfiles correspondientes a los periodos de retorno de 25 y 50 años están separados a lo largo de todo el tramo, lo que indica un comportamiento hidráulico uniforme, sin tener ninguna influencia significativa de condiciones locales vinculadas a variaciones geométricas del cauce. En términos generales, el periodo de retorno de 50 años de la figura 3-15, literal b) tiene tirantes mayores en comparación con el del literal a) de 25 años, como resultado del aumento del caudal que debe ser trasladado por la sección.

Figura 3-16: Gráfica de la envolvente del río Zhío de la energía total y la longitud del tramo en un periodo de 25 y 50 años



a) Período de retorno 25 años

b) Período de retorno 50 años

Fuente: Autores

En la envolvente de energía total a lo largo del tramo, se identifica una variación de los valores entre los periodos de retorno de 25 y 50 años, sin tener ninguna coincidencia entre las curvas, lo que evidencia una respuesta hidráulica uniforme y menor influencia de ajustes por fricción en comparación con el río Collay. No obstante, se observa diferencias constantes entre ambos escenarios a lo largo del tramo. En términos generales, el periodo de retorno de 50 años de la figura 3-16 del literal b), presenta valores elevados de energía total respecto al del literal b) de 25 años, como consecuencia del mayor caudal y de los tirantes mayores asociados.

En el río Collay, las envolventes de los periodos de retorno de 25 y 50 años coinciden en ciertos tramos, producto de la disipación de energía por fricción; sin embargo, se observan separaciones en zonas donde existen variaciones en el ancho y la geometría de la sección, lo que evidencia la influencia de condiciones locales en la respuesta hidráulica. En contraste, en el río Zhío las envolventes se mantienen separadas a lo largo del tramo, lo que indica una respuesta uniforme del sistema, con baja influencia de efectos locales vinculados a la geometría del cauce. En ambos casos, el periodo de retorno de 50 años

produce valores elevados en las variables hidráulicas, reflejando el efecto del mayor caudal sobre el aumento de la velocidad, el tirante y la energía del flujo.

3.11. Índice de sensibilidad

El índice de sensibilidad (IS) facilita evaluar qué tan sensible es una variable hidráulica respecto a cambios en el coeficiente de Manning “n”, el IS es el cociente entre ambas variaciones relativas. Su interpretación indica que si $IS = 1$, la respuesta es proporcional, si $IS > 1$ es muy sensible, y por último si el $IS < 1$ tiene una baja sensibilidad:

$$IS = \frac{\Delta Variable / Variable \text{ promedio}}{\Delta n / n};$$

$$\Delta Variable = Variable \text{ máxima} - Variable \text{ mínima};$$

$$\Delta n = n \text{ máximo} - n \text{ mínimo};$$

Donde:

IS = Índice de sensibilidad (adimensional)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional)

A continuación, se muestra los resultados del Índice de sensibilidad del río Collay y Zhío:

Tabla 3-6. Índice de sensibilidad del río Collay

Índice de sensibilidad	Velocidad (m/s)		Lámina de agua (m)		Energía Total (m)	
	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años
	1.061	1.051	0.836	0.848	0.0014	0.0014

Fuente: Autores

En la Tabla 3-6 correspondiente al río Collay, el índice de sensibilidad evidencia que la velocidad tiene valores superiores a la unidad ($IS > 1$), lo que indica una alta sensibilidad frente a variaciones del flujo, debido a su dependencia directa del caudal y de la resistencia hidráulica del cauce. En contraste, la lámina de agua presenta valores de ($IS < 1$), lo que refleja una menor sensibilidad, ya que su cambio es amortiguado por la geometría de la sección y la capacidad del flujo para redistribuir la energía mediante el

aumento del tirante. De manera similar, la energía total también tiene un índice de sensibilidad baja a la unidad, lo que indica una respuesta estable del sistema, producto del equilibrio entre la energía cinética y potencial, donde los incrementos en una componente tienden a compensarse con disminuir en la otra, manteniendo constante la energía global del flujo.

Tabla 3-7. Índice de sensibilidad del río Zhío

Índice de sensibilidad	Velocidad (m/s)		Lámina de agua (m)		Energía Total (m)	
	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años
	0.930	0.957	0.686	0.679	0.0012	0.0013

Fuente: Autores

En la Tabla 3-7 correspondiente al río Zhío, se observa que la velocidad tiene valores de índice de sensibilidad menores a la unidad ($IS < 1$), lo que señala una baja sensibilidad frente a los cambios del flujo, debido a que su respuesta no es de manera directa proporcional a los cambios que hay en el caudal, sino que está amortiguada por las condiciones de resistencia del cauce. De igual manera, la lámina de agua tiene un ($IS < 1$), evidenciando una baja sensibilidad hidráulica, lo que se traduce en variaciones poco significativas del tirante ante incrementos del flujo, controladas por la geometría de la sección. Finalmente, la energía total muestra igualmente valores de ($IS < 1$), lo que refleja una respuesta alta estable del sistema, producto del equilibrio que hay entre la energía cinética y potencial, donde los cambios de una componente son iguales por la otra, manteniendo constante la energía global del flujo.

Al comparar los ríos Collay y Zhío, se observa que el río Collay tiene una mayor sensibilidad en la velocidad frente a las variaciones del flujo, mientras que la lámina de agua y la energía total mantienen un comportamiento estable. En contraste, el río Zhío muestra una baja sensibilidad en todos sus parámetros hidráulicos, reflejando una respuesta uniforme del sistema. Esta diferencia es por las características hidráulicas

propias de cada cauce de montaña, donde el río Collay presenta una mayor heterogeneidad en su geometría transversal y variaciones locales en la rugosidad, lo que aumenta la respuesta del flujo ante cambios de caudal. Por su parte, el río Zhío presenta condiciones geométricas regulares y mayor continuidad hidráulica, lo que beneficia un comportamiento más estable y con menor variabilidad en sus variables hidráulicas.

3.12. Variación total (%)

La variación total (%) se aplica para determinar el cambio relativo que tiene una variable hidráulica con respecto a su valor promedio. Este indicador ayuda a evaluar qué tan dispersos o variables son los resultados de una variable analizada:

$$VAR (\%) = \frac{\Delta Variable}{Variable \text{ promedio}} * 100 ;$$

$$\Delta Variable = Variable \text{ máxima} - Variable \text{ mínima} ;$$

Donde:

$VAR (\%) =$ Variación Total (adimensional)

A continuación, se muestra los resultados de la variación total del río Collay y Zhío:

Tabla 3-8. Variación total del río Collay

Variación Total (%)	Velocidad (m/s)		Lámina de agua (m)		Energía Total (m)	
	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años
	183.61	181.86	144.75	146.81	0.24	0.24

Fuente: Autores

En la tabla 3-8, la energía total del río Collay presenta la menor variación, manteniéndose constante con un alrededor de 0.24, lo que sugiere un equilibrio entre sus componentes cinética y potencial dentro del sistema hidráulico analizado. Además, se observa que la velocidad tiene la mayor variabilidad, con valores cercanos entre 182 y 184, lo que evidencia una respuesta mayor del flujo ante cambios en las condiciones hidráulicas del

tramo. En contraste, la lámina de agua se aprecia una variación moderada, con un valor aproximado a 145, indicando cierta estabilidad en la profundidad del flujo pese a los cambios del caudal.

Tabla 3-9. Variación total del río Zhío

Variación Total (%)	Velocidad (m/s)		Lámina de agua (m)		Energía Total (m)	
	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años
	166.04	170.82	122.52	121.52	0.22	0.23

Fuente: Autores

En la tabla 3-9, se observa que la velocidad es el parámetro que tiene mayor variabilidad, con valores aproximados entre 166 y 171, lo que indica que es el más sensible frente a las condiciones hidráulicas del flujo. En segundo lugar, la lámina de agua tiene una variación intermedia, entre valores de 121 y 123, evidenciando cierta estabilidad en la profundidad del flujo pese a los cambios que tiene el caudal. Finalmente, la energía total es el parámetro menos variable, con valores muy cercanos entre 0.22 y 0.23, lo que refleja un comportamiento constante del sistema hidráulico, explicado por la compensación que existe entre la energía cinética y potencial del flujo.

A continuación, se muestra los resultados de la variación total y el índice de sensibilidad del río Collay y Zhío en las siguientes tablas:

Tabla 3-10. Resumen del índice de sensibilidad más la variación total del río Collay

Método	Velocidad (m/s)		Lámina de agua (m)		Energía Total (m)	
	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años
Índice de sensibilidad	1.061	1.051	0.836	0.848	0.0014	0.0014
Variación Total (%)	183.61	181.86	144.75	146.81	0.24	0.24

Fuente: Autores

Tabla 3-11. Resumen del índice de sensibilidad más la variación total del río Zhío

Método	Velocidad (m/s)		Lámina de agua (m)		Energía Total (m)	
	25 años	50 años	25 años	50 años	25 años	50 años
Índice de sensibilidad	0.930	0.957	0.686	0.679	0.0012	0.0013
Variación Total (%)	166.04	170.82	122.52	121.20	0.22	0.23

Fuente: Autores

El las tablas 3-10 y 3-11, el río Collay como el Zhío presentan un comportamiento hidráulico muy parecido, donde la velocidad es el parámetro más variable y, por tanto, el más sensible a las condiciones del flujo. La lámina de agua muestra una variación intermedia para ambos casos, reflejando una respuesta moderada del tirante frente a los cambios de caudal. Por otro lado, la energía total se mantiene constante en los dos ríos, lo que evidencia un equilibrio hidráulico global del sistema, producto de la compensación entre las componentes cinética y potencial del flujo.

CONCLUSIONES

La recopilación de información topográfica, batimétrica, geotécnica e hidrológica constituyó la base fundamental para el desarrollo del modelo hidráulico, permitiendo representar con precisión la geometría, morfología y condiciones de flujo de los ríos Collay y Zhío. Los datos obtenidos evidenciaron que ambos cauces presentan características propias de ríos de montaña, tales como pendientes elevadas, secciones irregulares y presencia de material granular grueso, factores que condicionan de manera directa el comportamiento hidráulico. La calidad y nivel de detalle de esta información permitió definir adecuadamente los parámetros geométricos, caudales de diseño y condiciones de frontera, garantizando una modelación consistente y representativa del sistema fluvial analizado.

La determinación del coeficiente de rugosidad de Manning demostró que la calidad y representatividad de los datos recopilados influyen directamente en los resultados obtenidos, especialmente en el caso de las formulaciones basadas en la granulometría. En este estudio, las muestras tomadas en las márgenes del cauce generaron valores no representativos del canal principal, lo que derivó en una subestimación del coeficiente de rugosidad. A pesar de esta limitación, el análisis permitió establecer que los valores de Manning presentan una amplia variabilidad, con rangos que van aproximadamente desde 0.0137 hasta 0.104 dependiendo del método aplicado. Los valores más bajos corresponden a formulaciones granulométricas, mientras que los más altos; obtenidos mediante parámetros hidráulicos y métodos empíricos, reflejan de mejor manera las condiciones reales de los ríos de montaña.

Los resultados de la modelación hidráulica evidenciaron que el coeficiente de Manning influye de manera directa en los parámetros hidráulicos del flujo, mostrando

comportamientos consistentes en ambos ríos analizados. La velocidad presenta una relación inversamente proporcional con la rugosidad, disminuyendo a medida que el valor de “n” aumenta debido al incremento de la resistencia al flujo. Por su parte, la lámina de agua muestra un comportamiento directamente proporcional, incrementándose conforme aumenta el coeficiente de Manning como resultado de la reducción en la capacidad hidráulica del cauce. Así mismo, la energía total del flujo refleja una mayor disipación de energía asociada a la fricción y turbulencia en cauces con mayor rugosidad. Estos resultados confirman que el coeficiente de Manning controla de manera significativa la respuesta hidráulica del sistema.

El análisis del índice de sensibilidad mostró que, aunque el coeficiente de Manning influye en todos los parámetros evaluados, la magnitud de dicha influencia es moderada, ya que los valores obtenidos no se aproximan ni superan la unidad. Esto indica que el sistema no presenta una respuesta extrema ante variaciones de “n”, sino una sensibilidad controlada y progresiva. En este contexto, la velocidad presenta la mayor respuesta relativa frente a cambios en la rugosidad debido a que depende directamente del balance entre la pendiente energética y las pérdidas por fricción, siendo el parámetro más afectado por la resistencia del cauce. En cambio, la lámina de agua muestra variaciones menores, ya que el incremento de rugosidad tiende a ser compensado por el aumento del tirante necesario para mantener la continuidad del flujo. De manera similar, la energía total presenta cambios más atenuados, dado que se mantiene un equilibrio entre sus componentes cinética y potencial, lo que reduce su sensibilidad global frente a modificaciones en el coeficiente de Manning.

Los resultados de la variación total porcentual evidencian que, aunque la sensibilidad del sistema es moderada, los cambios en el coeficiente de Manning generan diferencias

apreciables en los parámetros hidráulicos, lo que puede influir de manera significativa en la estimación de niveles de agua y condiciones de flujo. No obstante, se observan diferencias entre el río Collay y el río Zhío, a pesar de tratarse ambos de ríos de montaña, lo cual se explica por las particularidades geométricas e hidráulicas de cada cauce. En el río Collay, la mayor irregularidad en la sección transversal y la presencia de variaciones locales de rugosidad incrementan la respuesta del flujo ante cambios en “n”, mientras que en el río Zhío las condiciones más uniformes del cauce y una geometría más regular favorecen un comportamiento más estable, reduciendo la magnitud de las variaciones observadas.

Los resultados permiten establecer que el coeficiente de rugosidad de Manning es un parámetro determinante en la modelación hidráulica, cuya variación influye directamente en la velocidad, la lámina de agua y la energía del flujo. Aunque el índice de sensibilidad indica que la respuesta del sistema no es extrema, la variación total demuestra que los cambios en “n” sí generan diferencias relevantes en los resultados, lo que resalta la importancia de una adecuada selección de este coeficiente. En consecuencia, es fundamental emplear valores representativos del cauce y considerar las características propias de los ríos de montaña para garantizar simulaciones hidráulicas confiables y técnicamente sustentadas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que, en el diseño y evaluación hidráulica de ríos de montaña, el coeficiente de Manning no se adopte como un valor único, sino dentro de un rango representativo de la variabilidad del cauce, comprendido aproximadamente entre 0.035 y 0.104. Este intervalo recoge condiciones desde cauces relativamente lisos hasta altamente rugosos, propias de ríos de montaña con variaciones en material del lecho, vegetación y geometría. Asimismo, se sugiere incorporar análisis de sensibilidad como parte obligatoria del modelamiento hidráulico, con el fin de evaluar la incertidumbre en la estimación de la lámina de agua y reducir el riesgo de subdimensionamiento o sobredimensionamiento en obras hidráulicas.

Se puede implementar procesos de calibración del modelo hidráulico con información de campo, como niveles de crecida observados o evidencias de eventos extremos, para ajustar el coeficiente de Manning y reducir la variabilidad en los resultados, mejorando la confiabilidad en la predicción de velocidades y tirantes en condiciones reales.

En proyectos hidráulicos se puede adoptar la zonificación del coeficiente de Manning dentro del cauce, en lugar de emplear un valor uniforme, con el objetivo de representar de forma más realista la heterogeneidad de los ríos de montaña y mejorar la precisión de los resultados obtenidos.

Referencias

- Adams, D. L., & Zampiron, A. (2020). Multiscalar roughness length decomposition in fluvial systems using a transform-roughness correlation (TRC) approach. *Earth Surface Dynamics*, 1039-1046.
- Akan, A. O., & Iyer, S. (2021). *Open channel hydraulics (2.ª ed.)*. Elsevier.
- Bathurst, J. C. (2018). At-a-site variation of flow resistance in mountain rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 207–226.
- Bladé Castellet, E. (2005). *Modelación hidráulica*.
- Brunner, G. W. (2023). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual (Version 6.x)*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Buffington, J. M., & Montgomery, D. R. (1997). A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources Research*, 1993–2029.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Comiti, F., & Lenzi, M. A. (2012). Flow resistance in steep mountain streams: A review. *Earth Surface Processes and Landforms*, 425-446.
- Comiti, F., & Mao, L. (2021). Flow resistance and roughness in mountain streams: Implications for hydraulic modeling. *Journal of Hydrology*, 125-135.
- Cowan, W. L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, 473–475.
- Cunge, J. A., Holly, F. M., & Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing.
- Díaz-Salas, A., Guevara-Pérez, E., & Rosales-Cueva, J. (2020). Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay–Carhuaz, Áncash, Perú. *Revista Ingeniería UC*, 328–342.
- Einstein, H. A. (1950). *The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows*. Washington: U.S. Department of Agriculture.
- Ferguson, R. I. (2010). Time to abandon the Manning equation? *Earth Surface Processes and Landforms*, 1873–1876.
- Fernández de Córdova Webster, C. J., León Méndez, A. J., & Rodríguez, Y. (2020). Influencia del coeficiente de rugosidad de Manning en las áreas de inundación del río Yanuncay en Cuenca. *Hydraulic and Environmental Engineering/Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(1), 115-126.
- French, R. H. (1985). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Grant, G. E. (1997). Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: A new hypothesis. *Water Resources Research*, 349-358.

- Hey, R. D. (1997). Channel morphology and sediment transport. En *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management* (págs. 51–79). Chichester: John Wiley & Sons.
- Jarrett, R. (1984). Hydraulics of high-gradient streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1519–1539.
- Lamichhane, S., Devkota, N., Dawadi, S., & Tamrakar, J. (2023). Estimation of hydraulic parameter (Manning’s roughness coefficient) in mountainous river at middle stage of Hindu Kush Himalaya region. *Journal of Innovations in Engineering Education*, 134-141.
- Lane, E. W., & Carlson, W. E. (1953). Roughness characteristics of mountain streams. *Transactions, American Geophysical Union*, 875-880.
- Limerinos, J. T. (1963). *The determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels*.
- Manners, R. B., Wilcox, A. C., & Merritt, D. M. (2011). The role of vegetation on channel morphology and flow resistance in mountain streams. *Geomorphology*, 178-191.
- Manning, R. (1981). *On the flow of water in open channels and pipes*.
- Martínez Ramírez, D. X., & Solano González, H. A. (2020). *DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DEL RÍO TOMBAMBA MEDIANTE FORMULAS EMPÍRICAS*. Cuenca.
- Martínez Ramírez, D. X., & Solano González, H. A. (2020). *Determinación del coeficiente de rugosidad del río Tombamba mediante fórmulas empíricas*. Cuenca: [Tesis de grado, Universidad del Azuay]. Universidad del Azuay.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research (IAHR)*, 39-64.
- Palacios Domínguez, J. P. (2021). *Evaluación de los modelos hidrodinámicos HEC-RAS 1D y 2D en un tramo del río Yanuncay de la ciudad de Cuenca*. Cuenca: Universidad Católica de Cuenca.
- Rickenmann, D. (1990). Debris flows and their relation to bedload transport in steep mountain streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 507–526.
- Rickenmann, D., & Recking, A. (2011). Evaluation of flow resistance in steep, gravel-bed rivers. *Water Resources Research*, Artículo W07506 (la revista Water Resources Research utiliza códigos de artículo en lugar de un rango tradicional de páginas).
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Simons, D. B., & Sentürk, F. (1977). *Sediment Transport Technology*. Colorado: Water Resources Publications.
- Sisalima, J. (2022). Two-dimensional hydraulic modeling of mountain rivers: Importance of detailed roughness mapping. *Environmental Modelling & Software*, 105-117.

- Soomro, S.-e.-h., Hu, C., Babar, M. M., & Aamir, M. H. (2021). Estimation of Manning's roughness coefficient through calibration using HEC-RAS model: A case study. *American Journal of Civil Engineering*.
- Strickler, A. (1923). *Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen*. Berna: Mitteilungen des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft.
- Sturm, T. W. (2021). *Open channel hydraulics (3.^a ed.)*. McGraw-Hill Education. Obtenido de Determinación de la mancha de inundación variando el coeficiente de Manning – sector del coliseo Jefferson Pérez: <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d756bbe3-1632-4b68-a842-abb22d79f353/content>
- Takata, H., Obata, S., Sato, T., & Shimatani, Y. (2024). Back-Calculation of Manning's Roughness Coefficient by 2D Flow Simulation and Influence of In-Channel Physical Parameters in a Mountain River, Japan. *Water*, 320.
- Timbe Castro, L. M., Rodas Bustamante, M. C., & Campozano Parra, L. V. (2022). *Sensibilidad del coeficiente de Manning en la estimación de los niveles de crecida para el MAP*.
- Universidad del Azuay. (2020). *Departamento de UDACivil*.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education.
- Yen, B. C. (1992). Dimensionally homogeneous Manning's formula. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1326-1332.
- Yen, B. C. (2010). Open channel flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1102-1109.
- Zahedi, B., & Noormand, B. (2015). Providing a mathematical model to calculate Manning roughness coefficient in mountainous rivers based on geotechnical properties of the substrate and the hydraulic properties of flow section. *Specialty Journal of Architecture and Constructio*, 43–55.