

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Análisis del coeficiente de rugosidad en ríos de montaña mediante la aplicación de modelos hidráulicos bidimensionales (2D)

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Civil

Autor:

Hernán Jeremías Tacuri Tacuri

Director:

Esteban Remigio Sánchez Cordero

ORCID: 0000-0002-8206-386X

Codirector:

Juan Sebastián Cedillo Galarza

ORCID: 0000-0001-6866-8937

Cuenca, Ecuador

2023-03-07

Resumen

Uno de los principales parámetros de entrada en una modelación hidrodinámica 2D, es el coeficiente de rugosidad. Para establecer su valor se usa diversos recursos, tales como: ecuaciones empíricas, tablas y fotografías. Sin embargo, cuantificar su valor para morfologías de un río de montaña puede generar error de hasta un 30%, debido a que la resistencia al flujo es un fenómeno complejo. En el presente trabajo se evaluó el desempeño de varias metodologías para predecir el coeficiente de n de Manning; con este propósito se introdujo una incertidumbre al variar el coeficiente en $\pm 10\%$ y $\pm 30\%$. Tres zonas con alta variabilidad morfológica pertenecientes al río Quinuas fueron seleccionadas para la obtención de datos de campo. La evaluación se realizó a través de la comparación de calados de agua medidas en campo versus las alturas de agua promedio generadas en los modelos hidrodinámicos bidimensionales. Las metodologías adimensionales resultaron tener un mejor desempeño para predecir los coeficientes de rugosidad, usar una u otra metodología no representa cambio significativo para una misma morfología y caudal. Sin embargo, las demás metodologías, en ciertos casos, muestran un desempeño similar a las metodologías adimensionales. La morfología cascada registra menos sensibilidad a la variación de los coeficientes de rugosidad, seguido por la morfología grada, y con una mayor sensibilidad registra la morfología lecho plano. Adicionalmente, a nivel general, las metodologías presentan una tendencia; existe un menor desempeño para las condiciones: caudales bajos, morfologías con menor pendiente de lecho y para valores bajos en los coeficientes de rugosidad.

Palabras clave: coeficiente de rugosidad, modelo hidrodinámico, río de montaña, lber 2D, incertidumbre

Abstract

One of the main input parameters in a 2D hydrodynamic modeling is the roughness coefficient. To establish its value, various resources are used, such as; empirical equations, tables and photographs. Nonetheless, quantifying the value of the fluvial morphology of a river mountain can generate an error up to 30% since flow resistance is a complex phenomenon. In the current paper, various methodologies were analyzed to predict the Manning's n coefficient. For this purpose, it was introduced an uncertainty obtained after varying the coefficient between +/- 10% and +/-30%. Three high variable mountain zones in terms of morphology of the Quinuas river were selected so that field data could be obtained. The corresponding evaluation was carried out by comparing different water levels measured in area vs the water levels average, generated after the Iber 2D hydrodynamic modeling. The dimensionless methodologies proved a better performance to predict roughness coefficient, using a u another does not represent a significant alteration for the same flow rate and morphology. However, the rest of the methodologies displayed a similar performance when compared to dimensionless ones. The Cascade morphology registers less sensitivity to roughness coefficient variations, followed by the Step-pool methodology, and the higher sensitivity was displayed by the Plane-bed morphology. It is worth mentioning that in general terms methodologies follow a tendency; there is a lower performance for the following conditions: low flow, morphologies with less bed slope, and for low values in the roughness coefficients.

Keywords: roughness coefficient, hydrodynamic modeling, mountain river, Iber 2D, Uncertainty

Índice

Índice de contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Dedicatoria.....	9
Agradecimientos.....	10
Capítulo 1.....	11
Introducción.....	11
1.1 Antecedentes.....	11
1.2 Justificación.....	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo General.....	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
Capítulo 2.....	14
Marco Teórico.....	14
2.1 Ríos de montaña.....	14
2.2 Clasificación morfológica de ríos de montaña.....	14
2.2.1 Grada-escalón.....	14
2.2.2 Lecho Plano.....	15
2.2.3 Cascada.....	15
2.3 Rugosidad.....	16
2.4 Metodologías usadas para obtener coeficiente de rugosidad.....	17
2.4.1 Ecuación de geometría hidráulica adimensional (Ferguson, 2007).....	17
2.4.2 Ecuación de ajuste logarítmico adimensional (Rickenmann & Recking, 2011).....	17
2.4.3 Metodología de geometría adimensional (Cedillo et al., 2021).....	18
2.4.4 Ecuación de resistencia Semilogarítmica (Bathurst, 1985).....	18
2.4.5 Potencial (Bathurst, 2002).....	18
2.4.6 Descomposición (Cowan, 1956).....	19
2.4.7 Método basado en fotografías.....	20
2.5 Modelaciones hidráulicas.....	20
2.6 Iber 2D.....	21
2.7 Métrica Estadística.....	22
Capítulo 3.....	22

Materiales.....	22
3.1 Descripción del Proyecto	22
3.1.1 Área de estudio.....	22
3.1.2 Topografía.....	24
3.1.3 Datos hidráulicos.....	25
3.2 Implementación del modelo 2-D.....	27
3.2.1 Entrada de Datos Topográficos	27
3.2.2 Diseño del cauce y llanura de inundación.....	29
3.2.3 Generación del Modelo Digital de Terreno (MDT).....	30
3.2.4 Simulación Preliminar en Iber.....	31
3.2.5. Parametrización del modelo	36
3.2.6 Procesamiento de resultados	39
Capítulo 4.....	41
Resultados	41
4.1 Comparación de la eficiencia de diversas metodologías para estimar el coeficiente de resistencia.	41
4.2 Consideración de la incertidumbre en la estimación del coeficiente de resistencia	42
4.3 Dispersión de los valores	49
Capítulo 5.....	53
Discusión	53
5.1 Eficiencia de las metodologías.....	53
5.2 Variación del coeficiente de resistencia.....	54
5.3 Sensibilidad de los modelos a la variación del coeficiente de resistencia	55
Capítulo 6.....	56
Conclusiones.....	56
Referencias.....	58
Anexos	60

Índice de figuras

Figura 1. Representación morfológica de cause en forma de grada (López, 2004) -----	15
Figura 2. Representación morfológica de cause de Lecho Plano (López, 2004) -----	15
Figura 3. Representación morfológica de cause en forma de cascada (López, 2004) -----	16
Figura 4. Ubicación de las zonas de estudio-----	23
Figura 5. Ubicación ampliada de la Zona de Grada-----	23
Figura 6. Ubicación ampliada de la Zona de Lecho Plano -----	24
Figura 7. Ubicación ampliada de la Zona de cascada-----	24
Figura 8. Precisión del intervalo de curvas de las superficies en Civil3D-----	28
Figura 9. Superficie generada en CIVIL 3D de la zona Grada -----	28
Figura 10. Superficie generada en CIVIL 3D de la zona Lecho Plano-----	29
Figura 11. Superficie generada en CIVIL 3D de la Zona de Cascada -----	29
Figura 12. Superficies en formato .xml-----	30
Figura 13. Modelo digital de terreno de la zona grada -----	30
Figura 14. Modelo digital de terreno de la zona de lecho plano -----	30
Figura 15. Modelo digital de terreno de la zona de cascada -----	31
Figura 16. Modelos digitales de terreno en formato Ráster-----	31
Figura 17. Creación de la geometría de los tramos de estudio dentro del programa Iber	32
Figura 18. Superficies generadas a partir de la geometría en Iber -----	32
Figura 19. Asignación de caudal de entrada y salida en el programa Iber -----	33
Figura 20. Asignación con n-Manning a las superficies-----	34
Figura 21. Generación de malla y asignación de elevaciones en Iber-----	34
Figura 22. Asignación de datos del problema -----	34
Figura 23. Ejecución del proceso de cálculo-----	35
Figura 24. Ventana de resultados de la zona Grada-----	35
Figura 25. Ventana de resultados de la zona lecho Plan-----	36
Figura 26. Ventana de resultados de la zona Cascada-----	36
Figura 27. Zona Cascada, en a) Tamaño de malla vs velocidad y b) Tamaño de malla vs calado-----	38
Figura 28. Grada, en a) Tamaño de malla vs velocidad y b) Tamaño de malla vs calado	38
Figura 29. Zona Lecho Plano, en a) Tamaño de malla vs velocidad y b) tamaño de malla vs calado-----	38
Figura 30. Ventana de resultados en Iber 2D-----	39
Figura 31. Perfil de morfología y caudal en Iber 2D-----	40

Figura 32. Valores de la métrica RMSE normalizada para cada variación del coeficiente de resistencia en la morfología de Grada	45
Figura 33. Valores de la métrica RMSE normalizada para cada variación del coeficiente de resistencia en la morfología de Lecho Plano	46
Figura 34. Valores de la métrica RMSE normalizada para cada variación del coeficiente de resistencia en la morfología de Cascada	48
Figura 35. Dispersión de los valores de la métrica RMSE normalizada en la morfología de Grada.....	51
Figura 36. Dispersión de los valores de la métrica RMSE normalizada en la morfología de Lecho Plano.....	51
Figura 37. Dispersión de los valores de la métrica RMSE normalizada en la morfología de Cascada.....	52

Índice de tablas

Tabla 1. Caudales y alturas de calados de cada sección para los tramos Grada, Lecho plano y Cascada	25
Tabla 2. Valores de n Manning de la Zona de Grada.....	25
Tabla 3. Valores de n Manning de la Zona de Lecho Plano.....	26
Tabla 4. Valores de n Manning de la Zona de Cascada.....	26
Tabla 5. Registro de datos de la zona Cascada en Iber: a) Tamaño de malla y velocidad, b) Tamaño de malla y calado.....	37
Tabla 6. Registro de datos de la zona Grada en Iber: a) Tamaño de malla y velocidad, b) tamaño de malla y calado.....	37
Tabla 7. Registro de datos del Lecho Plano en Iber: a) Tamaño de malla y velocidad, b) tamaño de malla y calado.....	37
Tabla 8. Valores de la métrica RMSE normalizada de diferentes metodologías de estimación del coeficiente de resistencia para los casos en análisis	42
Tabla 9. Anchos de banda para morfología grada	43
Tabla 10. Anchos de banda para morfología lecho plano	44
Tabla 11. Anchos de banda para morfología lecho plano	47
Tabla 12. Características principales de las dispersiones.....	49

Dedicatoria

A mi hermano Saúl, por haber sido el soporte incondicional y motivación que me ha permitido cumplir esta meta.

Agradecimientos

A mi familia: mi madre, hermanos, hermanas, cuñados y sobrinos por todo su apoyo incondicional a lo largo de este tiempo, gracias a ellos he podido culminar esta etapa.

Agradecimiento especial a mis tutores: Ing. Esteban Sánchez PhD e Ing. Sebastián Cedillo, por su generosa guía en la realización y culminación satisfactoria de este trabajo.

A mis amigos(as), compañeros(as) que han sido muy importantes a lo largo de mi vida académica, en especial a Alexandra por sus consejos y apoyo.

A mis profesores y personal de ingeniería por compartir sus conocimientos.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

Los modelos hidráulicos son herramientas ampliamente usados en todo el mundo que permiten por ejemplo la estimación de inundaciones, predicción del hábitat ecológico, diseños de ingeniería, predicción de profundidad y velocidad de un flujo, estimar la capacidad de flujo de un canal. etc. Esto se logra a partir de la resolución de ecuaciones de conservación mediante métodos numéricos y considerando una serie de hipótesis (Bladé et al., 2014). El parámetro de la rugosidad es un componente importante de entrada requerido en modelos 1-D y 2-D. Sin embargo, la estimación de su valor es compleja debido a los distintos fenómenos disipativos que pueden contener especialmente en un sistema complejo como los ríos de montaña. Estos sistemas son caracterizados por altas pendientes, alta variabilidad en el material que contiene el lecho, y una baja sumergencia relativa. Dado que, en los ríos de montaña la resistencia al flujo es un fenómeno complejo, los métodos disponibles para estimar el parámetro de rugosidad pueden generar errores de hasta $\pm 30\%$ (Bathurst, 2002; Bathurst, 1985; Wohl, 1998). El “coeficiente de rugosidad” o “factor de fricción” está en función implícita de condiciones geométricas de la superficie de fondo, geometría del canal, régimen del flujo y turbulencia. El cambio porcentual en la descarga asociado con la variación de la rugosidad es inversamente proporcional a la gradiente del canal, a la relación de ancho/profundidad, y proporcional a la rugosidad (Wohl, 1998). El parámetro de la rugosidad actúa de diferente manera en una modelación 1D que una en 2D, de aquí radica la importancia de conocer la metodología que estime de mejor manera el valor de la rugosidad (Morvan et al., 2008; Wohl, 1998).

En las últimas dos décadas, se ha desarrollado importantes avances en el uso de una nueva generación de modelos hidráulicos bidimensionales (2D) como alternativa más completa y precisa en determinados casos a la modelación unidimensional (1D) (Pérez et al., 2018). El desarrollo de la información topográfica en formato de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) han empujado aún más el empleo de la modelación 2D. Sin embargo, en algunas regiones de Latinoamérica, la modelación hidráulica 2D se ha visto limitada por la escasez de datos topográficos e hidroclimáticos. En el contexto Iberoamericano, Iber 2D es muy usado para realizar modelaciones de inundaciones fluviales con resultados satisfactorios (Pérez et al., 2018). Iber es un modelo matemático bidimensional de acceso libre para la simulación de flujo en ríos y estuarios desarrollado en colaboración del Grupo de Ingeniería Matemática GEAMA (Universidade da Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidade de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya y Centre

Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Bladé et al., 2014). El software Iber cuenta con una interfaz en pre y post proceso muy sencilla e intuitiva (Pérez et al., 2018). Iber 2D ha sido empleado en múltiples estudios de hidráulica aplicada, tales como: Simulación bidimensional de un evento de inundación y una medida estructural para proteger una comunidad vulnerable en la Delta del Río Ranchería (Colombia) (Pérez et al., 2018). Estudio hidráulico para la recuperación del Río Segre (Cataluña-España) y Cálculo de zonas inundables con un puente anegado en un tramo del Río Sarria (Lugo-España) (Bladé et al., 2014).

En la presente tesis evaluará el desempeño de varias metodologías para predecir los coeficientes de rugosidad, se determinará que metodología se ajusta de mejor manera a las mediciones obtenidas en campo. Se usará el modelo hidrodinámico Iber 2D para realizar las respectivas simulaciones hidrodinámicas, donde los valores de rugosidad serán usados como un parámetro de entrada. El trabajo comprende de varios capítulos: 1-Introducción, 2- Marco teórico, 3- Materiales, 4-Resultados, 5-Discusión y 6-Conclusiones.

1.2 Justificación

Para el presente trabajo de titulación se dispone de datos de campo topográficos e hidráulicos facilitados por el Ingeniero Sebastián Cedillo, que forman parte de su doctorado; de la misma manera, de la zona de estudio se dispone valores de “n” de Manning predecidos a través de 7 metodologías. Los datos de campo provienen de una zona montañosa con alta variación morfológica perteneciente al río Quinuas, del mismo se ha elegido 3 tramos para su estudio en el presente trabajo: a) morfología grada, con una longitud aproximada de 12m, una pendiente del 6.10%, contiene tres secciones de control y tres niveles de caudal (bajo, medio, alto); b) morfología de lecho plano, con una longitud aproximada de 6m, una pendiente de 3.16% , con tres secciones de control y tres niveles de caudal (bajo, medio, alto); c) morfología cascada, con una longitud aproximada de 18m, una pendiente del 8.5% , posee cinco secciones de control y tres niveles de caudal (bajo, medio, alto). Las metodologías usadas para predecir los valores de la rugosidad son: 1) Ecuación de geometría hidráulica adimensional 3 (Cedillo et al., 2021), 2) Ecuación de geometría hidráulica adimensional 2 (Rickenmann & Recking, 2011), 3) Ecuación de geometría hidráulica adimensional 1 (Ferguson, 2007), 4) Ecuación de resistencia Semilogarítmica (Bathurst, 1985), 5) Potencial (Bathurst, 2002), 6) Descomposición (Cowan, 1956), 7) Basado en Fotografías (Barnes, 1967). Como referencia principal, se usará el estudio realizado por Wohl (1998), donde los coeficientes de rugosidad obtenidos previamente serán modificados en el modelo hidrodinámico Iber 2D en un rango de incertidumbre de $\pm 10\%$ y del $\pm 30\%$. El desempeño de las diferentes metodologías será evaluado usando la métrica estadística RMSE (Root Mean

Square Error) normalizada, obtenida, a través de la comparación entre las alturas de agua tomadas en regletas en la zona de estudio versus las alturas de agua obtenidos del modelo hidrodinámico Iber 2D; modelo hidrodinámico que fue elegido dado su accesibilidad, resultados satisfactorios y la interfaz amigable con el usuario. De este trabajo se desea determinar que metodología se aproxima con mejor precisión a las observaciones y su aplicabilidad en ríos de montaña.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar la influencia que tiene el coeficiente de rugosidad al modelar ríos de montaña mediante un modelo hidráulico bidimensional (2D).

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar el desempeño que tienen distintas metodologías para estimar el coeficiente de resistencia.
2. Considerar el efecto que tiene en el desempeño de un modelo bidimensional al tomar en cuenta de incertidumbre en la estimación del coeficiente de resistencia en las distintas metodologías
3. Analizar la dispersión del desempeño en cada metodología de predicción del coeficiente de resistencia al tomar en cuenta la incertidumbre.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Ríos de montaña

Presentan mucha variabilidad espacial de la morfología de cauce introducido por la geología. A diferencia de ríos de llanura, los ríos de montaña sobresalen por presentar un sedimento mucho más grueso y una pendiente de cauce mucho más elevada. Presentan un flujo turbulento e hidráulicamente rugoso, subcrítico (salvo en pequeñas distancias y periodos cortos) y velocidades de flujo heterogéneas (López, 2004). Son caracterizados por tener pendientes pronunciadas generalmente más grandes a 0.4% y menores a 5%, y en pendientes superiores a 5% desarrollan unas series de piscinas y caídas. Los lechos consisten de materiales gruesos como grava, cantos rodados, clastos bien definidos y una reducida sumersión relativa. Ocurren inundaciones repentinas y cuando son grandes inundaciones existe un significativo transporte de sedimento con efectos considerables, lo que dificulta la medición de descargas directamente, especialmente en flujos altos, por lo que deben ser usados métodos indirectos para medir las descargas (Bathurst, 1985).

Existe un incremento en el estudio sobre los ríos de montaña para el desarrollo de los recursos hídricos, pesca, recreación y silvicultura donde para minimizar impactos adversos sobre el sistema fluvial se requiere ingeniería, geomorfología y estudios ecológicos, los mismos que deben estar basados en conocimientos sólidos de hidrología, hidráulica y procesos de sedimentación (Thome & Zevenbergen, 1985).

Conocer la velocidad media de flujo de un río de montaña es de importancia primaria para muchos aspectos, incluyendo ingeniería fluvial, análisis de riesgos, validación de modelación numérica, estudios ambientales, descarga de flujo. Y en los casos que no se pueden medir directamente o calculado con la ecuación de la continuidad ($U=Q/A$) donde el caudal Q y el área de la sección transversal A son conocidos, las descargas en un río de montaña pueden ser evaluados a través de ecuaciones de resistencia al flujo. La resistencia al flujo es un fenómeno complejo que depende de muchos componentes importantes, su evaluación se ve obstaculizada por la falta de información sobre las características de los ríos, y en un intento por disminuir la incertidumbre en las descargas se han adoptado varios métodos empíricos (Bathurst, 2002; Bathurst, 1985; Rickenmann & Recking, 2011).

2.2 Clasificación morfológica de ríos de montaña

2.2.1 Grada-escalón

Tramo fluvial de río de montaña caracterizado por tener lecho de pendiente pronunciada que oscila entre 2% y 9%, sedimento compuesto en el rango de canto ($\varnothing=60-250\text{mm}$) y bolo

($\varnothing \geq 250\text{mm}$), y el lecho se dirige longitudinalmente en una secuencia entre escalones formados por agrupaciones de los sedimentos de mayor tamaño y pozas formadas por partículas más finas (Figura 1). La separación media entre pozas varía entre uno y cuatro veces el ancho del cauce principal. La fuente de sedimento es fluvial, ladera y torrencial y se produce en las formas de fondo (López, 2004).

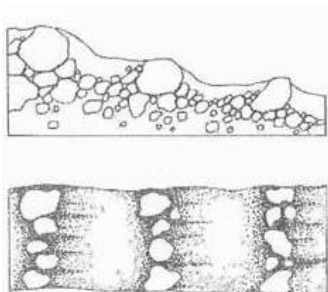


Figura 1. Representación morfológica de cause en forma de grada (López, 2004)

2.2.2 Lecho Plano

Tramos de río de montaña caracterizados por tener lecho de pendiente que oscila a valores inferiores a 2% y un máximo de 5%, presenta ausencia de formas de fondo bien definidas por lo que el lecho es relativamente plano, ocasionalmente distorsionada por elementos gruesos aislados (Figura 2). El tamaño de sedimento varía entre grava ($\varnothing=2-60\text{mm}$) y canto ($(\varnothing=60-250\text{mm})$), siendo la fuente dominante de origen fluvial aguas arriba, las márgenes inestables y corrientes o avenida impetuosa de aguas, mientras que las estructuras sedimentarias principales se producen por desbordamiento lateral (movimiento pendiente abajo de material rocosos, vegetal, ect) (López, 2004).

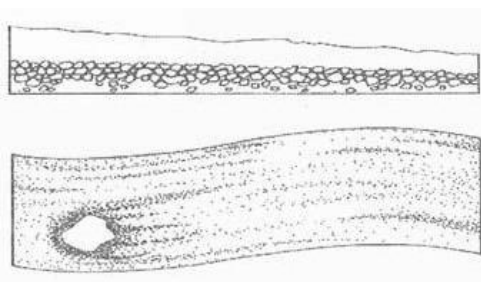


Figura 2. Representación morfológica de cause de Lecho Plano (López, 2004)

2.2.3 Cascada

Tramo de río de montaña compuesto por lecho de fuertes pendientes que oscilan en el rango de 3% y 20% en forma de cascada. El sedimento posee un tamaño entre canto ($\varnothing=60-250\text{mm}$) y bolo ($\varnothing \geq 250\text{mm}$), y se encuentra de manera desorganizada, tanto lateral como longitudinalmente (Figura 3). La separación entre los elementos más sobresalientes es inferior al ancho del cauce. La fuente de aporte de sedimento son de origen fluvial aguas arriba, y las

de origen no directamente fluvial ligadas a procesos morfogenéticos de vertiente como caídas y deslizamientos, así como lavas torrenciales. La acumulación de sedimento se produce principalmente alrededor de las obstrucciones de flujo (López, 2004).

2.3 Rugosidad

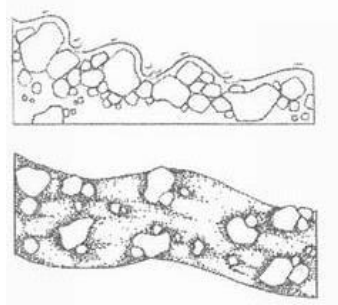


Figura 3. Representación morfológica de cause en forma de cascada (López, 2004)

La rugosidad en mecánica de fluidos es considerada en los límites de pared para tomar en cuenta el momentum y la disipación de energía que no están implícitos en formulaciones simples o discretas usadas en ingeniería numérica o la ciencia, donde este proceso físico es omitido (Morvan et al., 2008). Definido como un coeficiente de resistencia al flujo que a través de la forma física y la composición del material de lecho de un canal controla la profundidad, el ancho y la velocidad media de flujo. Tres coeficientes más comunes usados son: n de Manning, C de Chezy y f de Darcy-Weisbach (Thome & Zevenbergen, 1985).

La resistencia al flujo en ríos de montaña es un proceso complejo, un componente clásico del análisis hidráulico requerido para aplicaciones como enrutamiento de inundaciones, predicción de profundidad y velocidad de flujo para diseño de inundaciones, estimar la capacidad de inundación de un canal, predicción del hábitat ecológico, diseños de ingeniería, teoría del régimen geomorfológico, modelos de enrutamientos de sedimentos y otras aplicaciones prácticas y científicas. Sin embargo, por las características de los ríos de montaña y por la falta de datos disponibles actualmente las relaciones y formulas disponibles típicamente tienen errores de $\pm 30\%$ en su obtención, la mayoría de las relaciones tienen un contenido empírico significativo derivado de canales artificiales o datos de campo por lo que generan una incertidumbre e impiden el desarrollo de un método práctico satisfactorio (Bathurst, 2002; Bathurst, 1985; Ferguson, 2007).

La resistencia al flujo en ríos de montaña varía sobre la magnitud de la rugosidad y la interacción del proceso donde las variaciones promedio entre sitios no reflejan necesariamente las variaciones en un sitio (Bathurst, 1985). Donde el porcentaje de cambio en el caudal asociado con la variación de coeficiente de rugosidad n es inversamente

proporcional a la gradiente del canal y la relación de radio ancho/profundidad, y proporcional a la rugosidad.

2.4 Metodologías usadas para obtener coeficiente de rugosidad

2.4.1 Ecuación de geometría hidráulica adimensional (Ferguson, 2007)

Aplicada por Ferguson (2007), para estudios de campo en riachuelos rugosos con topografía de lecho irregular, en el cual las mediciones de caudal de flujo son más precisas que las mediciones de calado debido a que la superficie del agua complica determinar la profundidad representativa del flujo. Por esta razón muchos autores propusieron ecuaciones de geometría hidráulica adimensional que vinculan la velocidad media de flujo al caudal de flujo. La ecuación viene dada de forma adimensional y demostrada que funciona mucho mejor que otras ecuaciones (Ecuación 1):

$$U^* = kq^{*m}S^{(1-m)/2} \quad (1)$$

donde k y m son determinados empíricamente, S pendiente de lecho, $U^* = U/(gD_{84})^{0.5}$, g aceleración de la gravedad, U velocidad media de flujo, $q^* = q/(D_{84}^3)^{0.5}$, q caudal unitario Q/w , w es el ancho mojado y D_{84} es el cuartil 84 de la curva de distribución de material del lecho. como una característica de tamaño de grano por Ferguson.

2.4.2 Ecuación de ajuste logarítmico adimensional (Rickenmann & Recking, 2011)

Para obtener esta ecuación Rickenmann & Recking (2011), analizaron un set de datos compuesto por 2890 mediciones de campo, cubriendo un amplio rango pendientes de lecho, diámetros de grano, caudal de flujo y anchos de río. Donde dado la descarga q , e introduciendo variables adimensionales en ecuaciones de energía. Se utilizó técnicas de ajuste logarítmico para sustituir la ecuación (2) implícita de Ferguson

$$a_1^2 U^{**5} + a_2^2 U^{**10/3} q^{**5/3} = a_1^2 a_2^2 q^{**3} \quad (2)$$

en la que se encontró el valor de la ordenada en el punto de intersección de dos líneas rectas en un gráfico logarítmico. Las ecuaciones de la ley de energía $U^{**} = 1.443q^{**0.60}$ para profundidad relativa (d/D) baja y la ecuación $U^{**} = 3.70q^{**0.40}$ para la profundidad relativa (d/D) alta, las cuales formaron la relación funcional compuesta $U^{**} = \emptyset(q^{**})$. Dando como resultado le ecuación explícita de ajuste logarítmico (Ecuación 3), considerada aceptable para aplicaciones prácticas y comparada con otras ecuaciones los valores calculados de U tienen

una máxima diferencia de $\pm 0.7\%$, por otro lado los coeficientes y exponentes deben ser usadas con cuatro cifras significativas para limitar el error relativo a 1%.

$$U^{**} = 1.443 q^{**0.60} \left[1 + \left(\frac{q^{**}}{43.78} \right)^{0.8214 - 0.2435} \right] \quad (3)$$

2.4.3 Metodología de geometría adimensional (Cedillo et al., 2021)

Cedillo et al. (2021) usó la Ecuación 4, la misma que tiene la forma de la ecuación de Ferguson (2007), pero con los parámetros adimensionales usados para la ecuación de (Rickenmann & Recking, 2011). Los valores de a_1 , a_2 y a_3 son distintos para cada morfología y dependen de datos y de ecuaciones obtenidos a través de una regresión lineal. El procedimiento realizado para estimar el coeficiente es similar al que se usa en la metodología de Ferguson (2007).

$$U^{**} = a_1 q^{** a_2} S f^{a_3} \quad (4)$$

2.4.4 Ecuación de resistencia Semilogarítmica (Bathurst, 1985)

Método empírico adoptado por Bathurst (1985), con la intención de disipar la incertidumbre en la estimación del caudal de flujo en un río de montaña, dado que teóricamente o datos existentes todavía no son adecuados para respaldar desde un verdadero enfoque analítico, el método está basado en la ley de resistencia semilogarítmica para lechos de grava de río. La aplicación del método está limitada para flujos en canales bien definidos con una pendiente de lecho uniforme donde no hay bancos significantes o resistencia al flujo por vegetación, donde el transporte de sedimento involucra material grueso (grava y cantos rodados) en lugar de material fino (arena). Las mediciones de campo fueron recolectadas en 16 sitios sobre ríos de meseta y seleccionadas en sitios de modo que los controles de canal afecten el flujo. Los sitios fueron seleccionados sobre piscinas rápidas o entre piscinas a lo largo de un característico río de montaña. La ecuación sugerida (Ecuación 5) tiene un error promedio de -13% y un error relativo de $\pm 25\%$ a $\pm 35\%$.

$$\left(\frac{8}{f} \right)^{1/2} = 5.62 \log \left(\frac{d}{D_{84}} \right) + 4 \quad (5)$$

2.4.5 Potencial (Bathurst, 2002)

Con el objetivo de mejorar la precisión y la aplicabilidad de la relación de resistencia al flujo para ríos de montaña, (Bathurst, 2002) ensambló la relación empírica práctica (Ecuación 6) basada en la forma matemática para el cálculo sobre un amplio rango de bancos de flujo con los límites bien definidos sobre su aplicabilidad. El sitio de estudio considerado fue un río de

lecho de material grueso (grava, cantos rodados, guijarros) y pendiente en un rango de 0.1-5%, estos se encuentran entre lechos de grava, albercas de pendientes bajas, arroyos escalonados y torrentes de montaña bien empinados.

$$\left(\frac{g}{f}\right)^{1/2} = 3.10 \left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.93} \quad r^2 = 0.959 \quad (6)$$

La relación fue hecha considerando variaciones en un sitio de la resistencia al flujo, los datos de campo seleccionados fueron hechos en condiciones ideales de rugosidad de grano de lecho e identificando las características principales que determina la resistencia de grano, y también investigando empíricamente la medida a la cual las variaciones individuales en un sitio pueden converger en una sola relación.

2.4.6 Descomposición (Cowan, 1956)

Análisis realizado por Wohl(1998), dirigido a abordar la fuente de error al evaluar la sensibilidad del modelo con valores de n para varias configuraciones de 5 canales, las características relevantes consideradas fueron: área de drenaje, longitud de alcance, sección transversal, gradiente del canal, vegetación de la ribera, pico de descarga (estimada y medida), sustrato predominante del canal, razón ancho/profundidad y régimen climático. Uno de los métodos usados, fue el método de Cowan (Ecuación 7), diseñada específicamente para cuantificar el coeficiente de resistencia para llanuras de inundación.

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (7)$$

Donde n_b es el valor base de n para superficie de suelo desnudo natural de la llanura de inundación, n_1 es un factor de corrección por efectos de superficies irregulares en las llanuras de inundación, n_2 es un valor para variaciones en la forma y tamaño en la sección transversal de la llanura de inundación, n_3 es un valor para obstrucciones sobre las llanuras de inundación, n_4 es un valor para vegetación sobre la llanura de inundación y m es un factor de corrección para sinuosidad para llanuras de inundación. La ecuación 5 fue verificada para llanuras de inundación de zonas boscosas con profundidad de flujo de 0.8m a 1.5m.

El procedimiento fue llevado a cabo para cuatro valores estimados de n , para variación de ± 10 y ± 25 . De esta manera, las variaciones en los valores de n pueden ser equiparadas con las variaciones mejor estimadas del caudal, es decir las incertidumbres de n son trasladadas hacia las incertidumbres en el caudal.

Como resultado del análisis de sensibilidad, en la mayoría de los casos (con algunas excepciones) variando los valores de n en $\pm 10\%$ no hubo cambios en los valores estimados

del caudal, en cambio al variar los valores de n en $\pm 25\%$ generalmente los valores estimados del caudal cambiaron en un promedio de 10-12%. Finalmente Wohl (1998) concluyó, que “El porcentaje de cambio en el caudal asociado a las variaciones de n es inversamente proporcional al gradiente del canal y a la relación ancho/profundidad, y proporcional a la rugosidad”.

2.4.7 Método basado en fotografías

Método desarrollado para evaluar el coeficiente de rugosidad en canales abiertos a través de la habilidad y la experiencia, consiste en comparar la zona de estudio con fotografías de ciertos canales comunes que vienen acompañadas con descripciones de las condiciones y valores correspondientes de los coeficientes de resistencia, estos valores representan al momento que se tomó la fotografía. Una de las mayores sesiones, las mismas vienen con su respectiva descripción y cuantificado los valores de n de Manning para canales naturales y artificiales (Barnes, 1967). Posteriormente el U.S. Geological Survey utilizó el método basado en fotografías para realizar más estudios y determinar los coeficientes de rugosidad, incluyendo medidas en el área de la sección transversal, el ancho, la profundidad, la velocidad media y la pendiente. Las fotografías de los tramos fueron a colores estereoscópicas (Chow, 1994).

2.5 Modelaciones hidráulicas

Consiste en predecir los valores que toman las variables hidráulicas (calado, velocidades, caudal, etc.) a través de la modelación matemática del flujo de agua en un río o canales artificiales. Se realiza a partir de la resolución mediante métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis. La aplicación de las modelaciones hidráulicas es necesaria antes de una intervención física ingenieril y estas pueden ser modelos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensional (3D) (Bladé et al., 2014; Morvan et al., 2008; Pérez et al., 2018).

En las últimas décadas debido al desarrollo de ordenadores con mejores procesadores y más capacidad, la necesidad de estudiar fenómenos más complejos, la observación que en la naturaleza existen situaciones donde el flujo parece ser efectivamente bidimensional –es decir predominan las dimensiones horizontales sobre la vertical y al incremento en la oferta de información topográfica en formatos de modelos digitales de terreno (MDT) ha empujado a un importante avance en el uso de modelados numéricos hidráulico bidimensionales (2D-ecuaciones de aguas someras) como alternativa más completa y precisa en determinados casos, a la modelación unidimensional (1D) (Bladé et al., 2014; Pérez et al., 2018).

Actualmente existe una amplia oferta de software o modelos hidrodinámicos 2D pagos y/o de acceso libre para para la resolución del flujo de agua en lamina libre en 2 direcciones. Entre las más consolidadas, se encuentran: FLO-2D, DSS-WISE, TELEMAR2D, INFO Works, LISFLOOD-FP, Flood Modeller Pro, Mike-21, Sobek, TufLOW2D, Guad2D, HEC RAS 2D e Iber 2D (Bladé et al., 2014; Pérez et al., 2018).

Dentro de las modelaciones hidráulicas un factor importante introducido es el coeficiente de rugosidad, que actúa sobre las paredes para cuantificar pérdidas pequeñas de momentum y energía, los cuales no están incorporados en formulaciones discretas de problemas continuos. A pesar de que la rugosidad usada en modelos 1D, 2D pueden provenir de la misma fuente (n de Manning o C de Chézy), esta actúa de diferente manera en cada modelo (Morvan et al., 2008).

2.6 Iber 2D

Es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujo bajo supuestos de flujo turbulento de lámina libre en régimen no-permanente aplicada en ríos y estuarios desarrollado en colaboración del Grupo de Ingeniería Matemática GEAMA (Universidade da Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidade de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya y Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Desarrollada a partir de dos herramientas de modelización numérica bidimensional ya existentes, Turbillón y CARPA, ambas con el método de volúmenes finitos, que fueron integradas en un único código con nuevas capacidades. De uso libre, se puede descargar el software y documentación de soporte de la página web www.iberaula.es (Bladé et al., 2014).

Iber 2D cuenta con una interfaz en pre y post proceso sencilla e intuitiva, consta de diferentes módulos: turbulencia, transporte de sedimentos e hidrodinámica, esta última constituye la base de la herramienta empleando las ecuaciones de St. Venant 2D de aguas someras resueltas bajo el método de volúmenes finitos y sometidas al principio de conservación de la materia y de momento en dos de las direcciones horizontales. Su carácter gratuito lo convierte en una herramienta accesible para la aplicación en: simulación del flujo de lámina en causas naturales, evaluación de zonas inundables, cálculo hidráulico de encausamientos, cálculo hidráulico de redes de canales en lamina libre, cálculo de corrientes de marea en estuarios, estabilidad de los sedimentos del lecho y procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular. (Bladé et al., 2014; Pérez et al., 2018).

Iber 2D construye internamente la malla de cálculo, la cual representa la morfología del terreno en la hidrodinámica del modelo hidráulico a construir. En cada polígono de la malla se

resuelven las ecuaciones hidrodinámicas una vez asignadas a la geometría, los valores de la elevación de la MDT (modelo digital del terreno) y condiciones hidrodinámicas de contorno. En síntesis, el proceso que emplea Iber 2D es: a) Generación de la geometría de la zona de estudio: importación del MDT en formato ráster o ASCII; b) condiciones de contorno, definición de fronteras hidrodinámicas, contornos cerrados (tipo pared) y/o abiertos donde entra y sale el agua del dominio del cálculo; c) asignación de rugosidad, coeficiente de Manning de acuerdo a las coberturas del suelo; d) opciones generales del cálculo (tiempo de cálculo y parámetros del esquema numérico); e) construcción interna de la malla de cálculo: estructurada que cada elemento tiene el mismo número de vecinos, o no estructurada (diferentes números de elementos); y f) ejecución de la simulación, análisis y validación (Pérez et al., 2018).

2.7 Métrica Estadística

La métrica de ajuste RMSE (Root mean square error, o Error cuadrático medio) es una métrica estadística estándar usada para medir el desempeño de modelos en meteorología, calidad del aire y estudios de investigación climática. La sensibilidad de RMSE a valores atípicos es más común con esta métrica, penaliza la varianza, ya que otorga más peso a los errores con valor absoluto más grandes que a los errores con valores absolutos más pequeños (Chai & Draxler, 2014). La métrica normalizada viene dada por la ecuación 8

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - h_i)^2}}{\bar{h}} \quad (8)$$

Donde n es el número de datos, y_i valores de la altura de calado promedio de cada sección obtenidos de las modelaciones realizadas en Iber 2D, h_i altura del calado medidos en campo en el punto más profundo de cada sección, \bar{h} promedio de los calados medidos en campo.

Capítulo 3

Materiales

3.1 Descripción del Proyecto

3.1.1 Área de estudio

El río Quinuas se encuentra ubicado dentro del Parque Nacional Cajas, en la Parroquia Sayausí perteneciente al Cantón Cuenca, provincia del Azuay. Los datos recolectados y facilitados para el estudio pertenecen al sitio Virgen del Cajas a lo largo de 1.5 km como se observa en la Figura 4, donde están situados tres tramos específicos clasificados por su morfología como: la zona de grada, zona de lecho plano y zona de cascada.

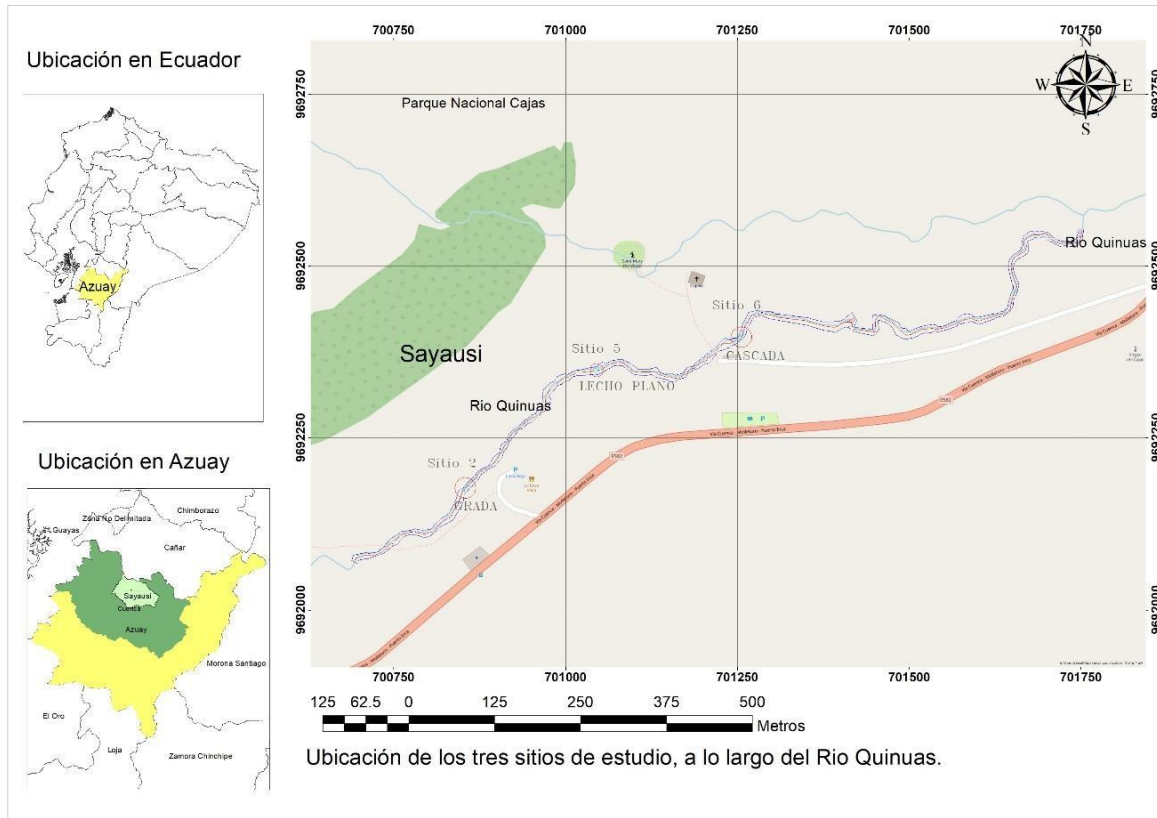


Figura 4. Ubicación de las zonas de estudio

Zona de Grada, localizada como sitio 2 en la Figura 4 y ampliada en la Figura 5, está situada entre los 3658 y 3656 m.s.n.m. Con una longitud aproximada de 12.00m para el estudio en este trabajo y una pendiente de 6.10%

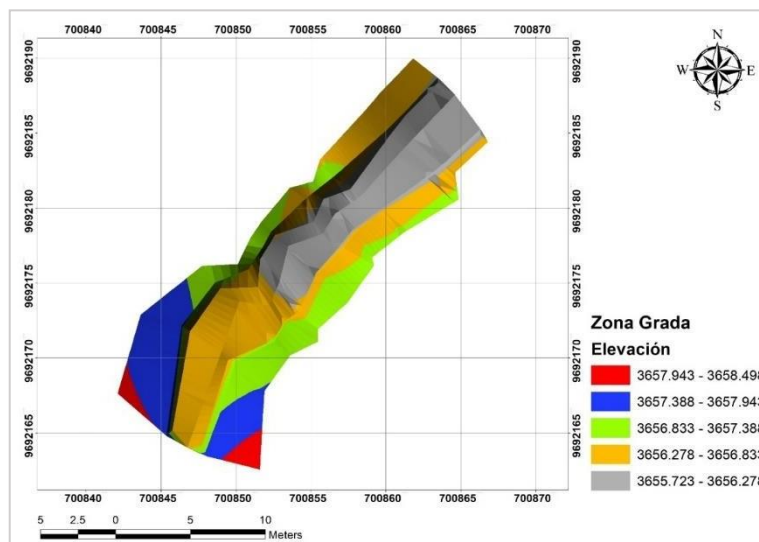


Figura 5. Ubicación ampliada de la Zona de Grada

El siguiente sitio Lecho Plano localizada como sitio 5 en la Figura 4 y ampliada en la Figura 6, está situada entre los 3645 y 3643 m.s.n.m. Con una longitud para su estudio aproximada de 6.00 m y una pendiente de 3.16%

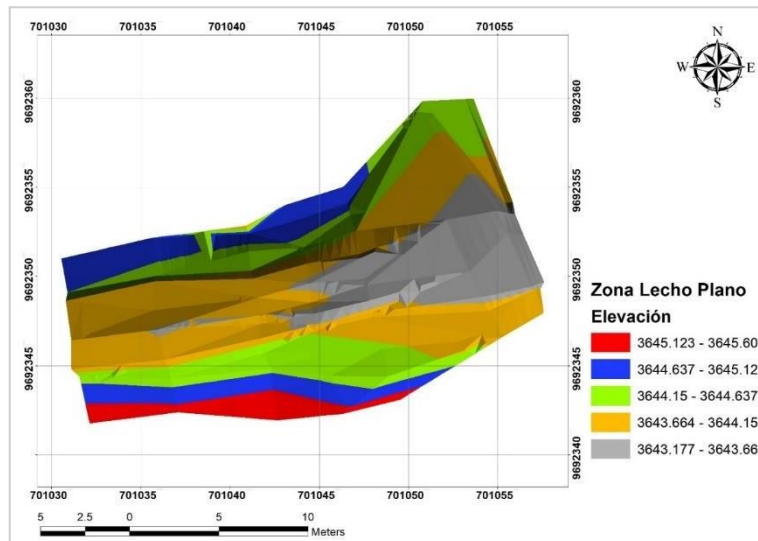


Figura 6. Ubicación ampliada de la Zona de Lecho Plano

Y finalmente la zona de Cascada, localizada como sitio 6 en la Figura 4 y ampliada en la Figura 7, está situada entre los 3632 y 3629 m.s.n.m. Con una longitud de estudio aproximada de 18.00 m y una pendiente de 8.5 %

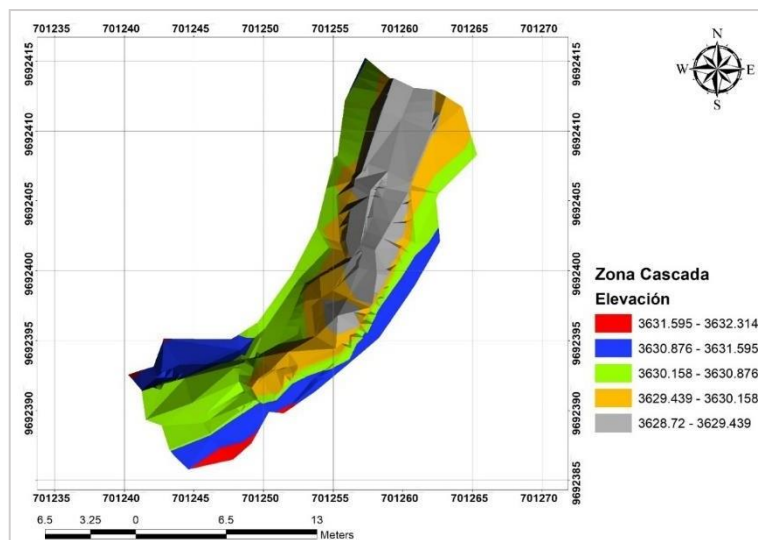


Figura 7. Ubicación ampliada de la Zona de cascada.

3.1.2 Topografía

Del área de estudio se cuenta con un levantamiento topográfico en formato CAD , medido con estación total para áreas con abundante vegetación y GPS diferencial para zonas sin

vegetación, a lo largo del Río Quinuas por una longitud de 1.5Km que garantiza una adecuada precisión y confiabilidad para su correcta ubicación, creación de la superficie y posterior de un Modelo Digital de Terreno (MDT), donde se tiene identificado el borde del río, la llanura de inundación, secciones de control y los tramos que van a ser implementados en la modelación 2D.

3.1.3 Datos hidráulicos

Los datos facilitados por el Ing. Sebastián Cedillo con los que se cuenta son: 3 niveles de caudales en m³/s (bajo, medio y alto) , su respectivo calado (h) en el punto más profundo de cada sección para cada tramo, ancho promedio de cada tramo, profundidad promedio de cada tramo y valores de n de Manning obtenidos en base a la medición de batimetría de campo aplicando las diferentes metodologías y su respectiva banda de incertidumbre (+10%, -10%,30%, -30%). Los datos se muestran sintetizadas en las tablas 1, 2, 3 y 4.

Tabla 1. Caudales y alturas de calados de cada sección para los tramos Grada, Lecho plano y Cascada

Sitio	Nivel	Caudal (m ³ /s)	Sección 1 (h1 cm)	Sección 2 (h2 cm)	Sección 3 (h3 cm)	Sección 4 (h4 cm)	Sección 5 (h5 cm)	w (m)	d (m)
Grada	Bajo	0.035	15.80	24.70	31.70			2.74	0.15
	Medio	0.443	28.80	38.20	46.10			3.52	0.28
	Alto	0.878	37.40	24.70	54.10			3.51	0.34
Lecho Plano	Bajo	0.063	19.30	20.60	27.40			2.49	0.12
	Medio	0.513	36.90	37.20	46.60			3.37	0.29
	Alto	0.918	38.90	43.20	52.10			3.71	0.33
Cascada	Bajo	0.065	19.20	28.50	46.90	70.50	28.60	3.22	0.11
	Medio	0.485	37.70	49.90	62.40	85.20	46.50	3.50	0.21
	Alto	0.708	44.20	52.80	65.60	92.10	55.80	3.66	0.28

Tabla 2. Valores de n Manning de la Zona de Grada

SITIO 2 (GRADA)	Método	Caudal	n Manning	+10%	-10%	+30%	-30%
	Cedillo y otros: Adimensional 3	Bajo	0.301	0.331	0.271	0.391	0.211
		Medio	0.141	0.155	0.127	0.183	0.099
		Alto	0.109	0.120	0.098	0.142	0.076
	Rickenmann & Recking: Adimensional 2	Bajo	0.303	0.333	0.272	0.394	0.212
		Medio	0.140	0.154	0.126	0.182	0.098
		Alto	0.108	0.119	0.097	0.141	0.076
	Ferguson: Adimensional 1	Bajo	0.309	0.340	0.278	0.402	0.216
		Medio	0.141	0.155	0.127	0.183	0.099
		Alto	0.108	0.119	0.097	0.141	0.076
Bathurst: Semilogarítmica	Bajo	0.103	0.113	0.093	0.134	0.072	
	Medio	0.058	0.064	0.052	0.076	0.041	

	Alto	0.055	0.061	0.050	0.072	0.039
	Bajo	0.145	0.159	0.130	0.188	0.101
Bathurst: Potencial	Medio	0.072	0.079	0.065	0.093	0.050
	Alto	0.065	0.071	0.058	0.084	0.045
Cowan: Descomposición	Bajo	0.110	0.121	0.099	0.143	0.077
	Medio	0.110	0.121	0.099	0.143	0.077
	Alto	0.110	0.121	0.099	0.143	0.077
Fotografías	Bajo	0.059	0.065	0.053	0.077	0.041
	Medio	0.059	0.065	0.053	0.077	0.041
	Alto	0.059	0.065	0.053	0.077	0.041

Tabla 3. Valores de n Manning de la Zona de Lecho Plano

SITIO 5 (LECHO PLANO)	Método	Caudal	n Manning	10%	-10%	30%	-30%
	Cedillo y otros: Adimensional 3	Bajo	0.167	0.184	0.150	0.217	0.117
		Medio	0.074	0.081	0.067	0.096	0.052
		Alto	0.056	0.062	0.050	0.073	0.039
	Rickenmann & Recking: Adimensional 2	Bajo	0.166	0.183	0.149	0.216	0.116
		Medio	0.074	0.081	0.067	0.096	0.052
		Alto	0.057	0.062	0.051	0.074	0.040
	Ferguson: Adimensional 1	Bajo	0.169	0.186	0.152	0.220	0.118
		Medio	0.073	0.081	0.066	0.095	0.051
		Alto	0.055	0.060	0.049	0.071	0.038
Bathurst: Semilogarítmica	Bajo	0.095	0.105	0.086	0.124	0.067	
	Medio	0.062	0.068	0.055	0.080	0.043	
	Alto	0.055	0.060	0.049	0.071	0.038	
Bathurst: Potencial	Bajo	0.135	0.148	0.121	0.175	0.094	
	Medio	0.080	0.088	0.072	0.104	0.056	
	Alto	0.065	0.072	0.059	0.085	0.046	
Cowan: Descomposición	Bajo	0.054	0.059	0.049	0.070	0.038	
	Medio	0.054	0.059	0.049	0.070	0.038	
	Alto	0.054	0.059	0.049	0.070	0.038	
Fotografías	Bajo	0.027	0.030	0.024	0.035	0.019	
	Medio	0.027	0.030	0.024	0.035	0.019	
	Alto	0.027	0.030	0.024	0.035	0.019	

Tabla 4. Valores de n Manning de la Zona de Cascada

SITIO 6 (CASCADA)	Método	Caudal	n Manning	10%	-10%	30%	-30%
	Cedillo y otros: Adimensional 3	Bajo	0.323	0.355	0.291	0.420	0.226
Medio		0.175	0.193	0.158	0.228	0.123	

	Alto	0.153	0.168	0.138	0.199	0.107
Rickenmann & Recking: Admiresional 2	Bajo	0.325	0.358	0.293	0.423	0.228
	Medio	0.174	0.191	0.156	0.226	0.122
	Alto	0.152	0.167	0.137	0.198	0.106
Ferguson: Admiresional 1	Bajo	0.332	0.365	0.299	0.432	0.232
	Medio	0.176	0.194	0.159	0.229	0.123
	Alto	0.154	0.169	0.138	0.200	0.108
Bathurst: Semilogarítmica	Bajo	0.120	0.132	0.108	0.157	0.084
	Medio	0.072	0.079	0.065	0.094	0.050
	Alto	0.066	0.072	0.059	0.085	0.046
Bathurst: Potencial	Bajo	0.164	0.180	0.148	0.213	0.115
	Medio	0.098	0.108	0.088	0.128	0.069
	Alto	0.086	0.094	0.077	0.111	0.060
Cowan: Descomposición	Bajo	0.110	0.121	0.099	0.143	0.077
	Medio	0.110	0.121	0.099	0.143	0.077
	Alto	0.110	0.121	0.099	0.143	0.077
Fotografías	Bajo	0.050	0.055	0.045	0.065	0.035
	Medio	0.050	0.055	0.045	0.065	0.035
	Alto	0.050	0.055	0.045	0.065	0.035

3.2 Implementación del modelo 2-D

A continuación, se describe la metodología realizada hasta conseguir la simulación bidimensional.

3.2.1 Entrada de Datos Topográficos

Los puntos convencionales de elevación x, y, z en unidades métricas recolectados con estación total y GPS diferencial para el estudio doctoral del Ing. Sebastián Cedillo, los que fueron facilitados para este trabajo de titulación en formato CAD; posteriormente procesados usando la herramienta AUTODESK CIVIL 3D hasta generar una superficie con un intervalo curvas menor de 0.05m e intervalo de curvas mayor de 0.10m (véase figura 8) para una mayor aproximación a la morfología del terreno, dando como resultado las superficies mostradas en las figuras 9, 10 y 11.

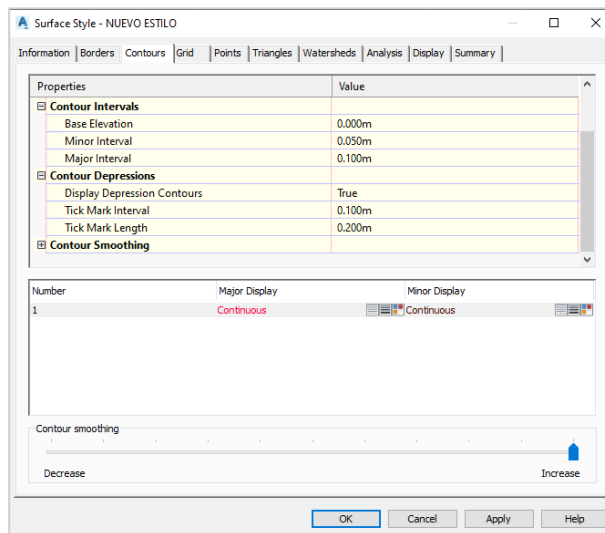


Figura 8. Precisión del intervalo de curvas de las superficies en Civil3D

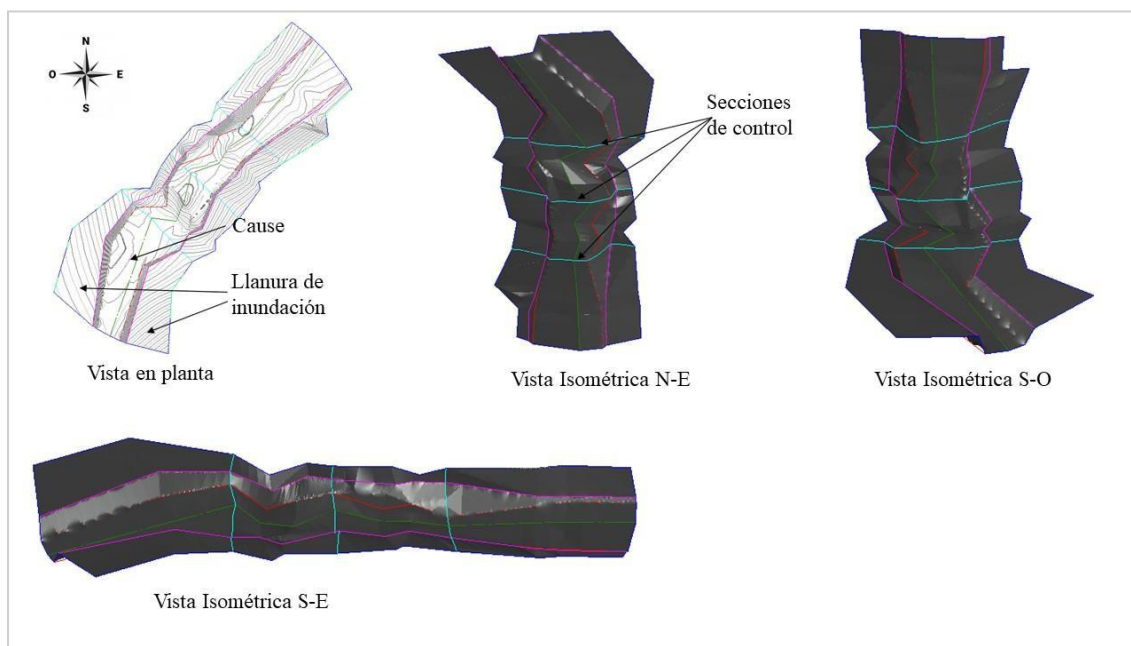


Figura 9. Superficie generada en CIVIL 3D de la zona Grada

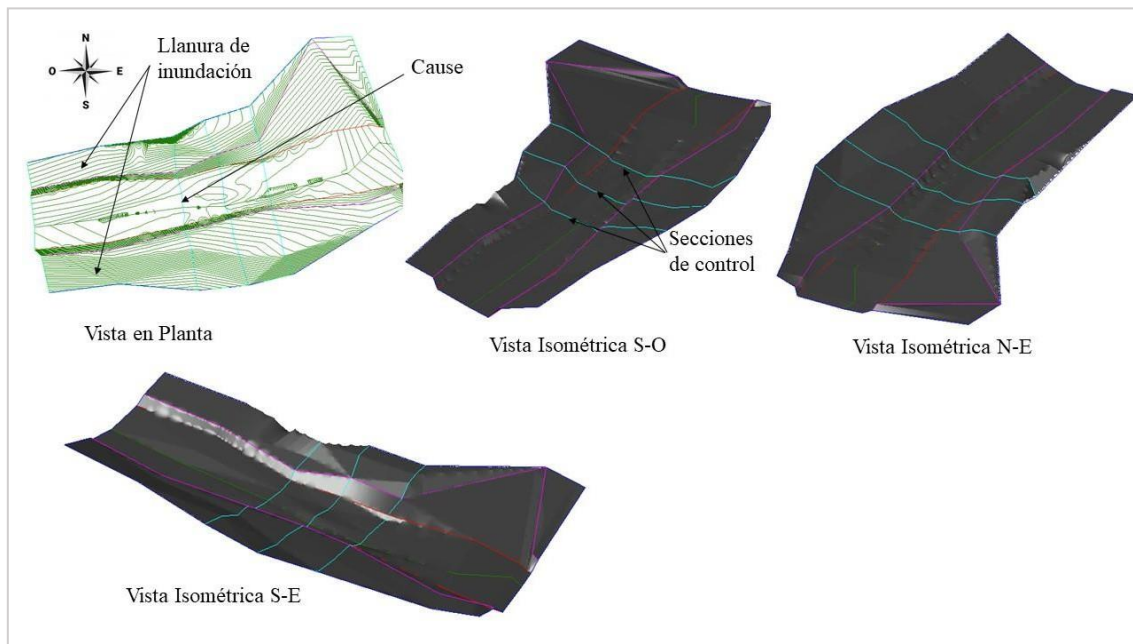


Figura 10. Superficie generada en CIVIL 3D de la zona Lecho Plano

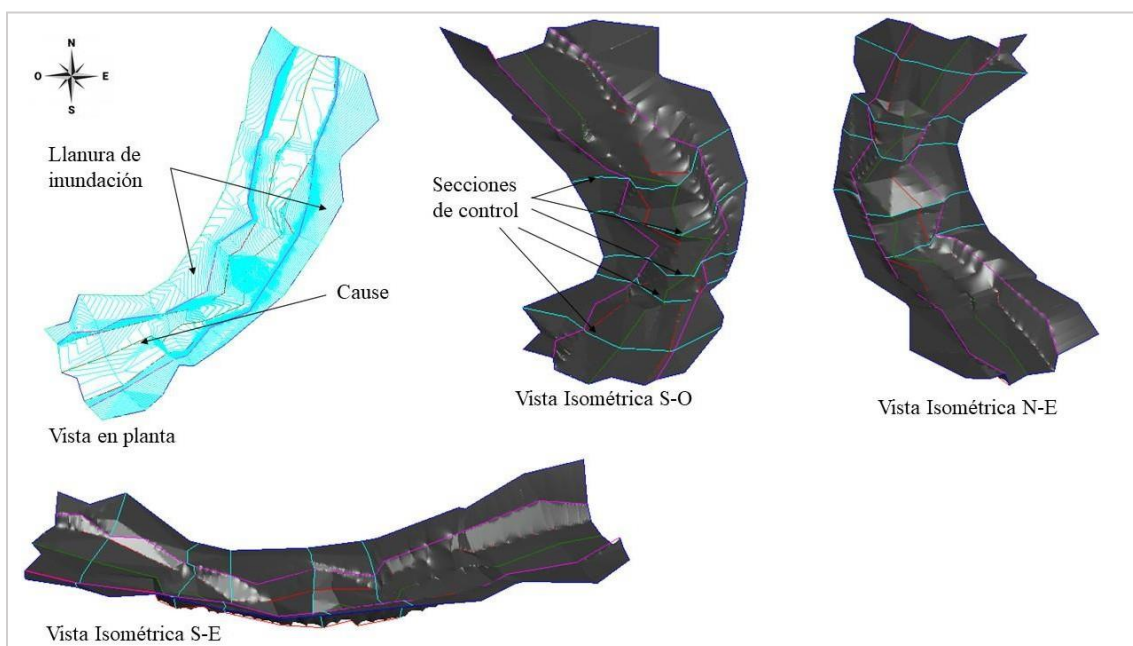


Figura 11. Superficie generada en CIVIL 3D de la Zona de Cascada

3.2.2 Diseño del cauce y llanura de inundación

Véase las figuras 9, 10 y 11 respectivamente, como parte de los datos topográficos se tiene conjuntamente identificados el cauce del río y la llanura de inundación.

3.2.3 Generación del Modelo Digital de Terreno (MDT)

Las superficies creadas en CIVIL 3D de cada tramo fueron exportadas en un archivo con formato .xml como indica la Figura 12, luego se procedió con la herramienta ArcMap 10.5 generar una superficie tridimensional mediante la creación de una red de triángulos irregulares (TIN) del terreno a partir de los archivos .xml con la función “Create TIN”.

Name	Type	Size
CASCADA.xml	XML Document	21,560 KB
grada.xml	XML Document	18,018 KB
lechoplano.xml	XML Document	20,311 KB

Figura 12. Superficies en formato .xml

En las figuras 13, 14 y 15 se muestran los modelos TIN de cada tramo respectivamente.

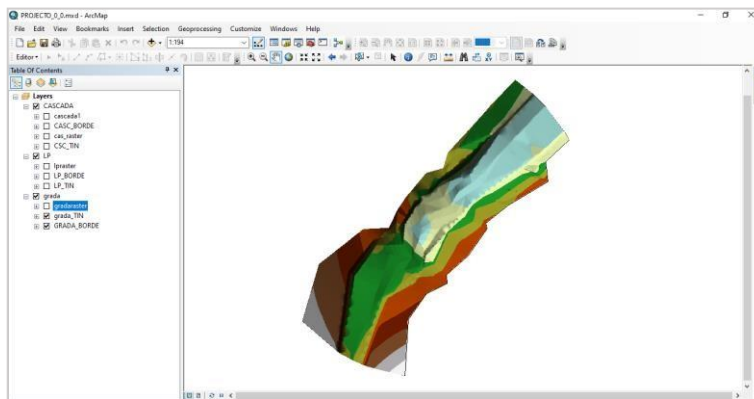


Figura 13. Modelo digital de terreno de la zona grada

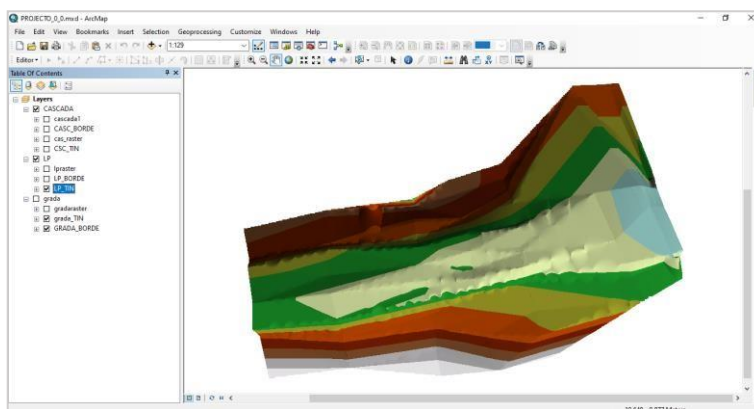


Figura 14. Modelo digital de terreno de la zona de lecho plano

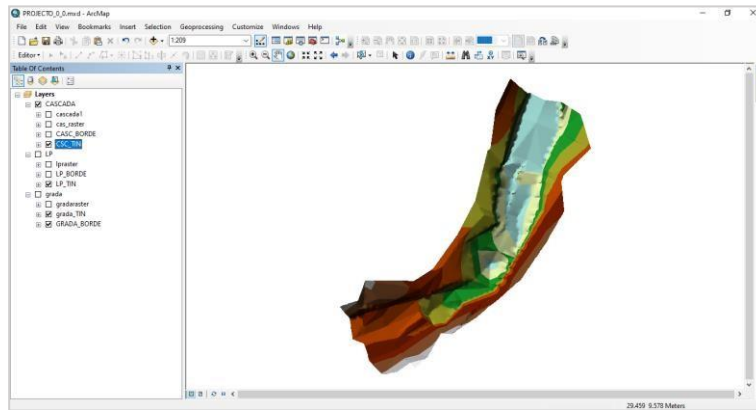


Figura 15. Modelo digital de terreno de la zona de cascada

Como siguiente paso fue realizar la rasterización de los modelos digitales de terreno (TIN) con un tamaño de celda de (x,y) $x=0.01m$, $y=0.01m$ utilizando la función “TIN to Raster”, los mismos se puede observar en la Figura 16.

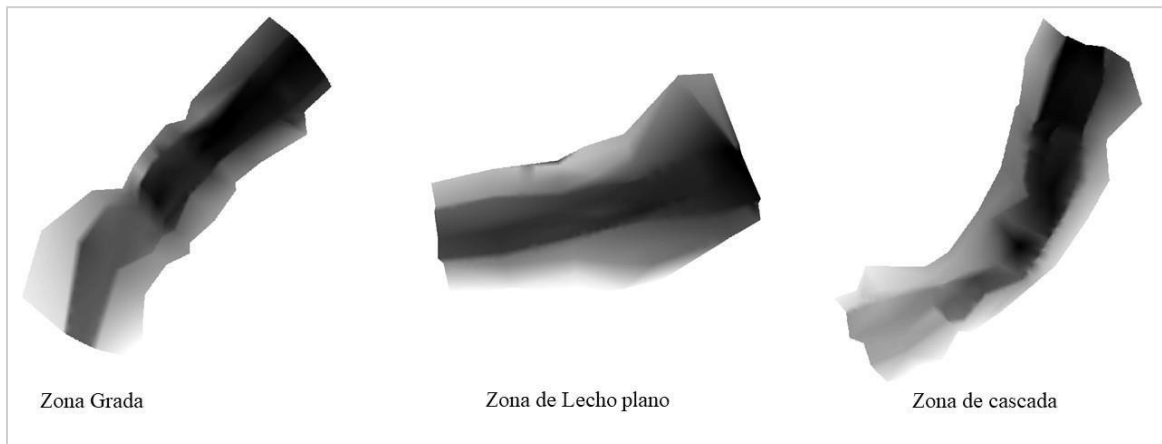


Figura 16. Modelos digitales de terreno en formato Ráster

Y por último los modelos ráster fueron exportados a un archivo .txt usando la función “Raster to ASCII”, estos archivos .txt serán los que se usarán para cargar la información de los modelos digitales de terreno al programa Iber.

3.2.4 Simulación Preliminar en Iber

De acuerdo al “Manual básico de usuario” Iber comprende de tres etapas diferenciadas: Preproceso que consta la entrada de datos, Proceso que permite la simulación hidráulica y Postproceso en la que se visualiza los resultados. La finalidad es verificar fallos en los MDT, identificar las secciones de entrada y salida de caudal, generar las superficies y asignar valores de rugosidad a la superficie del río, tomar los tiempos de simulación, elegir tamaño de convergencia de malla y comprobar que las respuestas sean aceptables.

Pre-Proceso. Con la secuencia de comandos “archivo/importar/shapefile” se inició importando la geometría de los tramos de estudio, desde un archivo en formato shapefile, el resultado se observa en la Figura 17 donde también se puede identificar que los tramos de estudio tienen delimitadas las zonas de cause y sus respectivas llanuras de inundación.

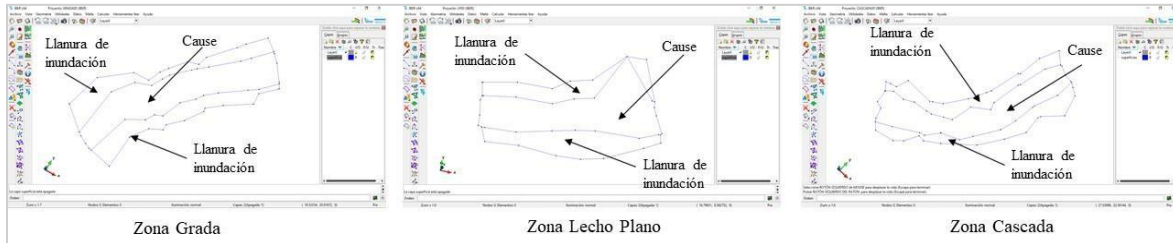


Figura 17. Creación de la geometría de los tramos de estudio dentro del programa Iber

Seguido se procedió con la creación de la superficie en la cual se las asignará los valores de rugosidad, aplicando los comandos “Geometría/Crear/Superficie NURBS/Por contorno”, generándose una superficie por cada área delimitada, el resultado se observa en la Figura 18.

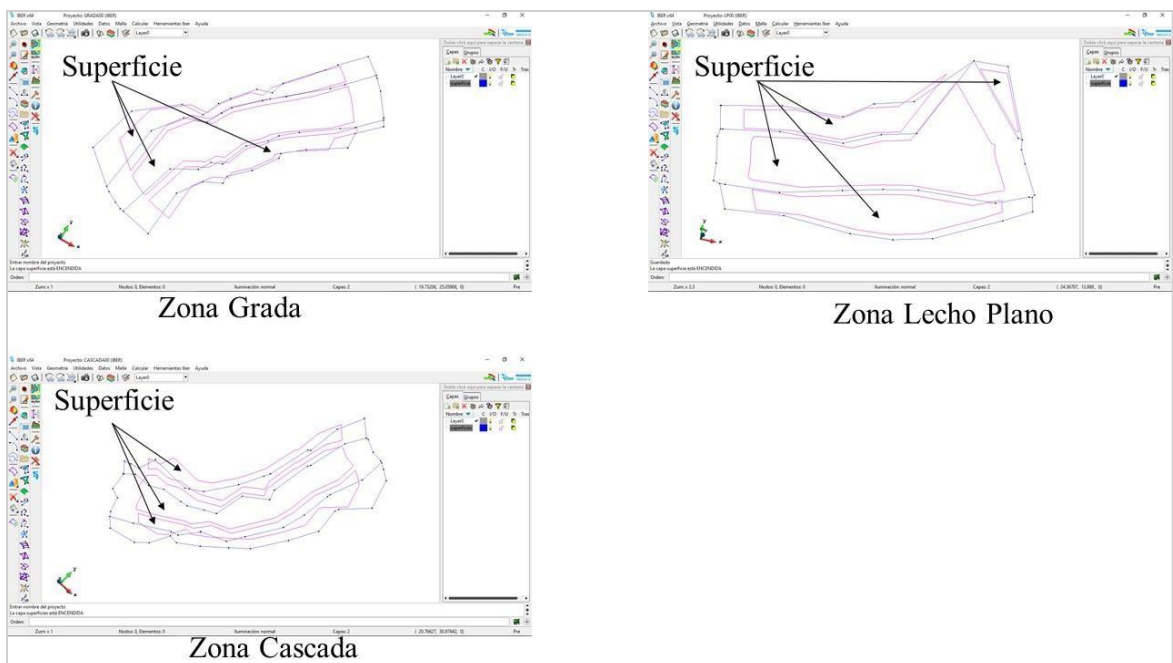


Figura 18. Superficies generadas a partir de la geometría en Iber

Acto seguido se asignó las condiciones de contorno, esto es la asignación de caudal de entrada y sección de salida del caudal, tipo de régimen (crítico/subcrítico), tiempo (0 s) y caudal, para ellos se usó los comandos “Datos/Hidrodinámica/Condiciones de Contorno/Entrada 2D y Salida 2D”, las secciones de entrada y salida se muestran de color rojo en la Figura 19.

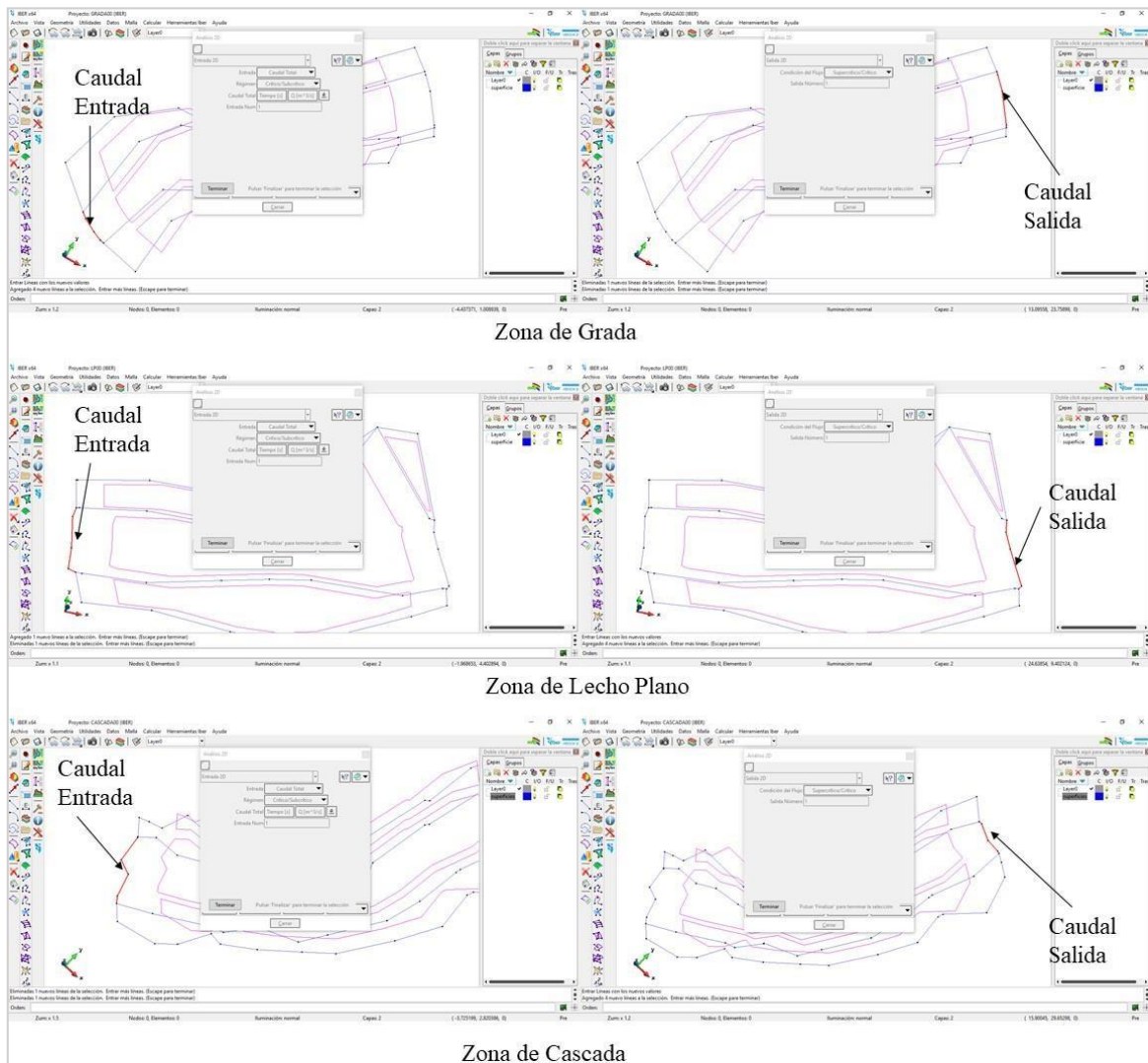


Figura 19. Asignación de caudal de entrada y salida en el programa Iber

Luego se asignó los valores de rugosidad a las superficies generadas anteriormente, aplicando los comandos “Datos/Rugosidad/Usos de suelo/nuevo uso de suelo/asignamos valor de Manning/Asignar superficie”. Se asignó el mismo valor de Rugosidad a la superficie del cauce que a las superficies de inundación (Ver Figura 20) debido a que los caudales medidos y observados en campo están muy por debajo del borde de la llanura de inundación y la superficie de la llanura de inundación no llega estar en contacto con el caudal dentro de este estudio en específico.

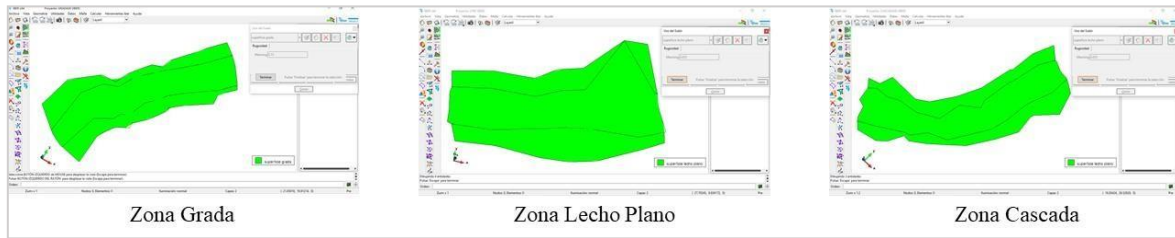


Figura 20. Asignación con n-Manning a las superficies

Y como último paso fue la creación de la malla, se usó la siguiente secuencia de comandos “Malla/Generar Malla/Digitar el tamaño de malla en metros”, luego asignamos las elevaciones desde los Modelos Digitales de Terreno (MDT) que se encuentran en archivos .txt (desarrollado en el capítulo 3.2.3) aplicando los comandos “Herramientas Iber/Malla/Editar/Asignar elevación desde archivo.../Buscar/Seleccionamos archivo .txt/Ajustar elevación/Todos los nodos/Aceptar”, cuyo resultado se observa en la Figura 21.

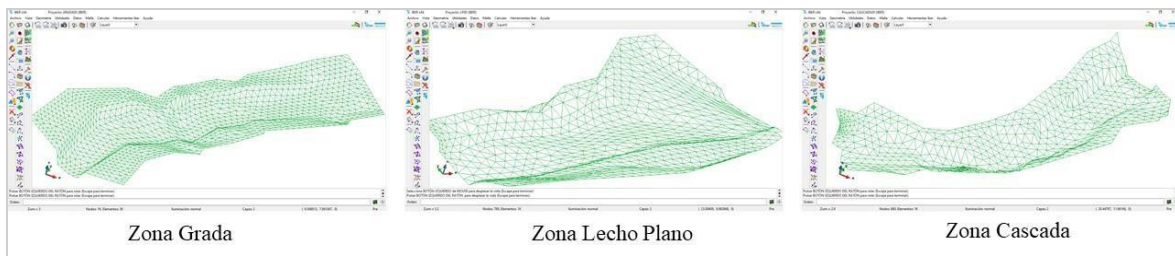


Figura 21. Generación de malla y asignación de elevaciones en Iber

Proceso o Cálculo. Para lanzar el cálculo primero se asignó los parámetros de cálculo o datos del problema con el siguiente comando “Datos/Datos del Problema...”, mostrando el menú de varios apartados como indica la Figura 22. Los apartados de interés para nuestros problemas fueron “Parámetros de Tiempo” donde para todas las modelaciones el instante inicial es 0, tiempo máximo de simulación depende del caudal, intervalos de tiempo 50, y “General” donde el único parámetro que se modificó fue el número de procesadores (depende de la capacidad del computador), en nuestro caso se usó un numero de 8 procesadores. Los demás parámetros permanecen por defecto.

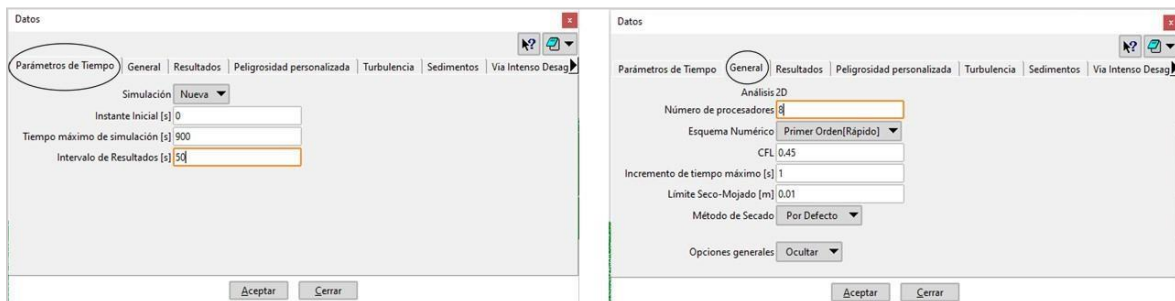


Figura 22. Asignación de datos del problema

Seguido, ejecutamos el cálculo con el comando “Calcular/Calcular”, mostrándonos una ventana del proceso en ejecución como indica la Figura 23.

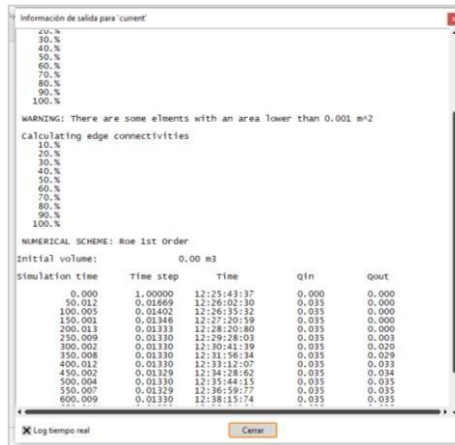


Figura 23. Ejecución del proceso de cálculo

Post-Proceso. Una vez finalizado el cálculo, se accedió al post-proceso para visualizar y verificar los resultados. El cambio entre las interfaces de pre-proceso y post-proceso se realiza mediante el menú “Archivo/postproceso” y “Archivo /preproceso”, o mediante los botones correspondientes de la barra de herramientas. Aplicando los comandos “Ventana/Ver resultados...” se observa la ventana de resultados y las diferentes opciones para visualizar los resultados de los tramos correspondientes como se muestra en las Figuras 24, 25 y 26.

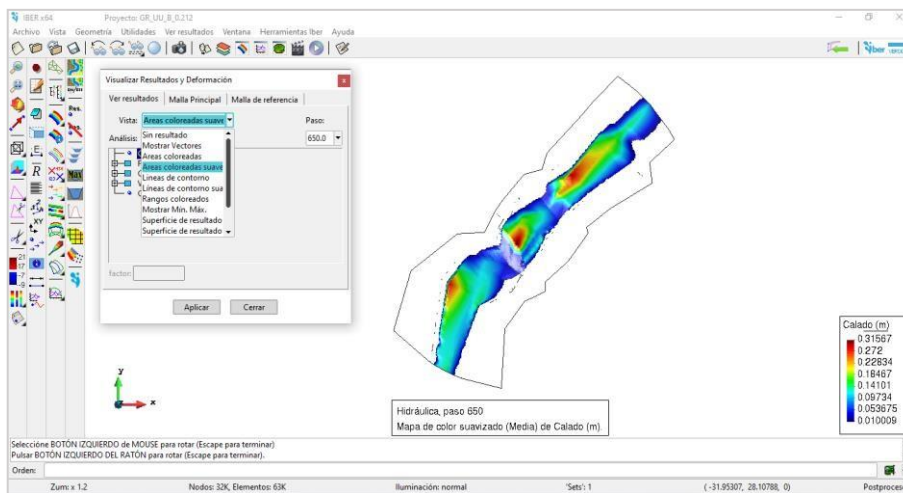


Figura 24. Ventana de resultados de la zona Grada

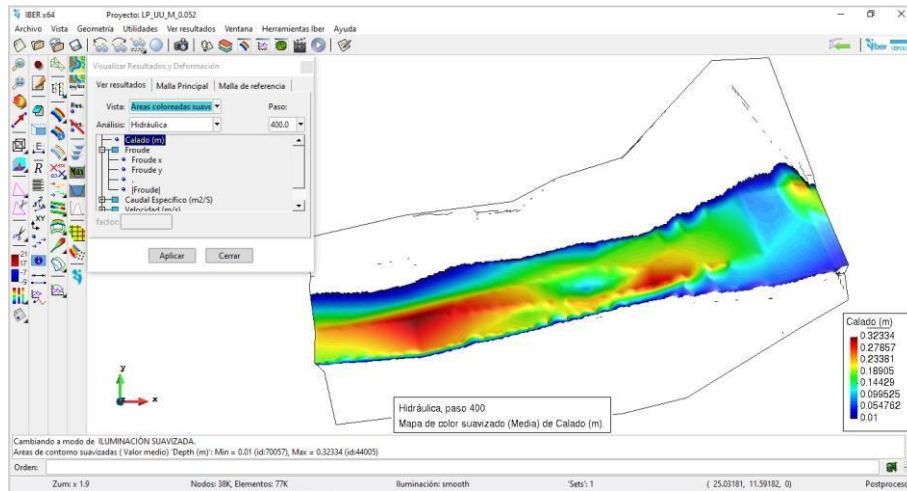


Figura 25. Ventana de resultados de la zona lecho Plan

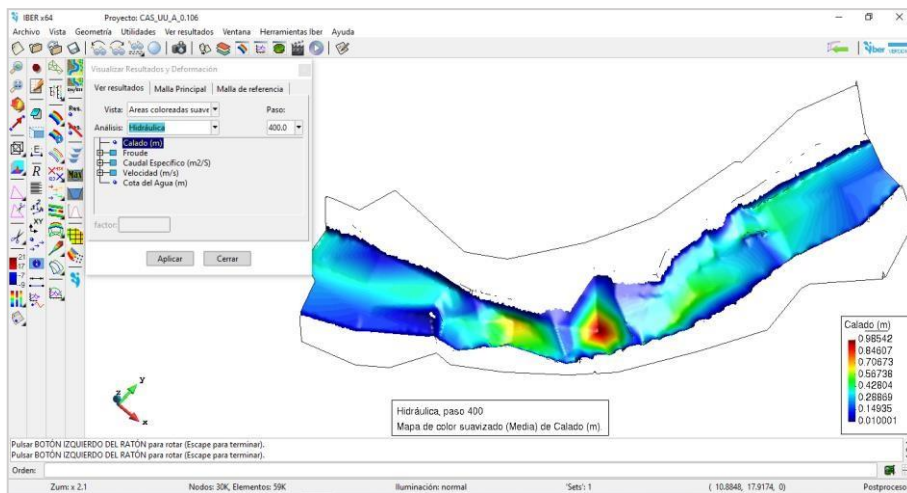


Figura 26. Ventana de resultados de la zona Cascada

3.2.5. Parametrización del modelo

En esta sección comprendió la preparación de los datos hidrológicos los mismos que se detallan en la sección 3.1.3, definición de las condiciones de contorno establecidas en la sección 3.2.4, condiciones hidrodinámicas también establecidas en la sección 3.1.3 y mallado de las zonas de estudio. Para establecer el tamaño de malla a la cual las modelaciones son estables, se tomó mediciones de velocidad y calado en 3 puntos representativos de cada zona de estudio a lo largo del cauce (inicio, medio y final) como indica la tabla 4, 5 y 6. Se realizó varias modelaciones hidrodinámicas con diferentes tamaños de mallas, empezando desde tamaño de 5 cm para la zona de cascada, debido al alto costo computacional que generó y al verificar que el calado y la velocidad se mantiene estable desde el tamaño de malla de 5cm hasta los 10cm como indica la figura 3-24, para las otras zonas de estudio se empezó desde

el tamaño de malla de 10cm. En base a las figuras 27, 28 y 29 generados a partir de los resultados de las tablas 5, 6 y 7 se definió que el tamaño malla para la parametrización de los modelos es de 10cm.

Tabla 5. Registro de datos de la zona Cascada en Iber: a) Tamaño de malla y velocidad, b) Tamaño de malla y calado

inicio (0,4)		medio (10.5,11)		final (15,23)		inicio (0,4)		medio (10.5,11)		final (15,23)	
T. Mall (cm)	Vel (m/s)	T. Mall (cm)	Vel (m/s)	T. Mall (cm)	Vel (m/s)	T. Mall (cm)	Cal (m)	T. Mall (cm)	Cal (m)	T. Mall (cm)	Cal (m)
5	0.162	5	0.065	5	0.097	5	0.151	5	0.711	5	0.185
10	0.163	10	0.058	10	0.098	10	0.155	10	0.704	10	0.181
20	0.161	20	0.055	20	0.096	20	0.153	20	0.701	20	0.174
25	0.155	25	0.054	25	0.100	25	0.149	25	0.620	25	0.182
30	0.154	30	0.050	30	0.104	30	0.136	30	0.654	30	0.177
40	0.148	40	0.067	40	0.099	40	0.116	40	0.638	40	0.178
50	0.131	50	0.052	50	0.105	50	0.111	50	0.628	50	0.178

a)

b)

Tabla 6. Registro de datos de la zona Grada en Iber: a) Tamaño de malla y velocidad, b) tamaño de malla y calado

Inicio (-4,8)		Medio (2,13)		Final (7,19)		Inicio (-4,8)		Medio (2,13)		Final (7,19)	
T. Mall (cm)	Vel (m/s)	T. Mall (cm)	Vel (m/s)	T. Mall (cm)	Vel (m/s)	T. Mall (cm)	Cal (m)	T. Mall (cm)	Cal (m)	T. Mall (cm)	Cal (m)
10	0.046	10	0.044	10	0.055	10	0.269	10	0.274	10	0.336
20	0.046	20	0.045	20	0.055	20	0.260	20	0.270	20	0.320
25	0.048	25	0.046	25	0.056	25	0.250	25	0.250	25	0.320
30	0.041	30	0.054	30	0.056	30	0.240	30	0.250	30	0.320
40	0.058	40	0.052	40	0.056	40	0.250	40	0.280	40	0.320
50	0.049	50	0.054	50	0.059	50	0.240	50	0.260	50	0.300

a)

b)

Tabla 7. Registro de datos del Lecho Plano en Iber: a) Tamaño de malla y velocidad, b) tamaño de malla y calado

Inicio (4,5)		Medio (12,7)		Final (22,10)		Inicio (4,5)		Medio (12,7)		Final (22,10)	
T. Mall (cm)	Vel (m/s)	T. Mall (cm)	Vel (m/s)	T. Mall (cm)	Vel (m/s)	T. Mall (cm)	Cal (m)	T. Mall (cm)	Cal (m)	T. Mall (cm)	Cal (m)
10	0.083	10	0.082	10	0.122	10	0.336	10	0.155	10	0.116
20	0.082	20	0.079	20	0.113	20	0.327	20	0.147	20	0.104
25	0.083	25	0.076	25	0.113	25	0.324	25	0.139	25	0.103
30	0.084	30	0.076	30	0.107	30	0.321	30	0.141	30	0.099
40	0.083	40	0.074	40	0.102	40	0.317	40	0.134	40	0.091
50	0.087	50	0.067	50	0.095	50	0.311	50	0.125	50	0.083
75	0.083	75	0.071	75	0.079	75	0.294	75	0.127	75	0.074
100	0.083	100	0.073	100	0.078	100	0.274	100	0.124	100	0.069

a)

b)

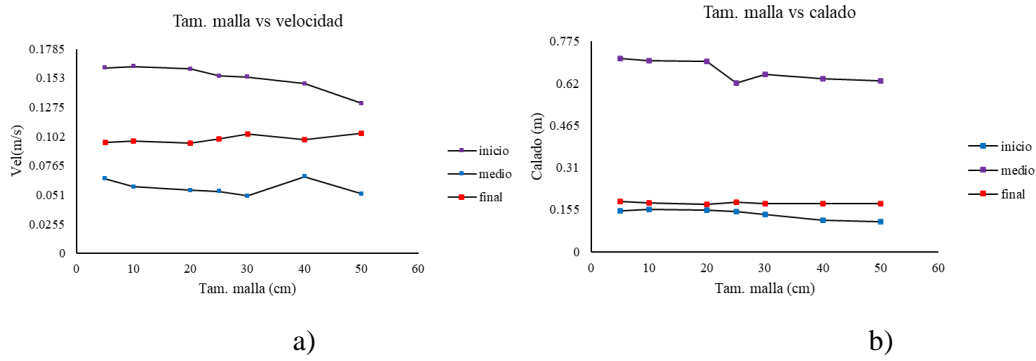


Figura 27. Zona Cascada, en a) Tamaño de malla vs velocidad y b) Tamaño de malla vs calado

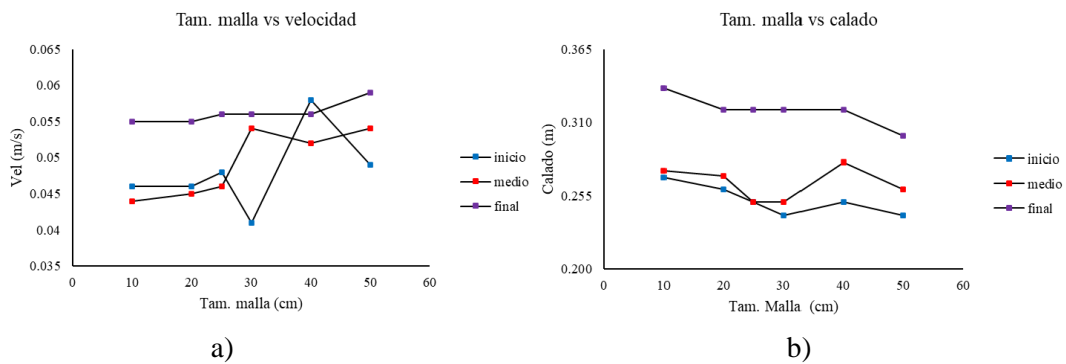


Figura 28. Grada, en a) Tamaño de malla vs velocidad y b) Tamaño de malla vs calado

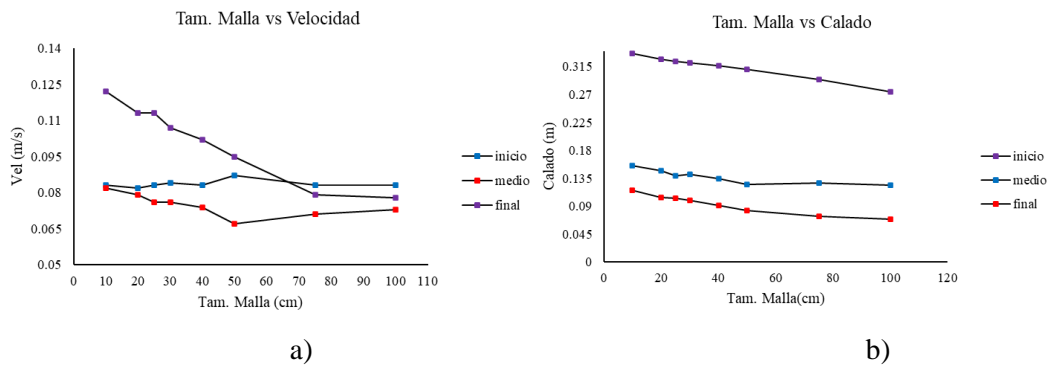


Figura 29. Zona Lecho Plano, en a) Tamaño de malla vs velocidad y b) tamaño de malla vs calado

Los tiempos de duración de cada modelación hidrodinámica estuvieron sujetos al nivel de caudal, de acuerdo a los resultados preliminares desde que ingresó, recorrió y salió el caudal, y para la parametrización se estableció como tiempo máximo: 600 segundos para caudal bajo, 350 segundos para caudal medio, y 250 segundos para caudal alto.

3.2.6 Procesamiento de resultados

Este proceso comprende la extracción de la información de los calados en cada sección de control para cada una de las morfologías en estudio. Para llevar a cabo, nos situamos en la interfaz “Postproceso” de cada una de las modelaciones (315 en total), nos dirigimos a “Ventana de resultados/Ver resultados/Áreas coloreadas suaves/Hidráulica/Calado y aplicar” como indica la figura 30. Seguido, nos dirigimos al comando “Archivo/ Importar/ Corte../ Dibuja superficie en un instante/ elegir valores de gráficas/ sección/ instante” y obtenemos una gráfica de perfiles donde nos indica la morfología y el caudal, tal como indica la Figura 31. Los datos de la Figura 31 exportamos en un archivo formato “.txt” utilizando el comando “Exportar/ Gráfico/ Todos los conjuntos de gráficas”. Y finalmente la información fue procesada utilizando una hoja de cálculo, en la que se obtuvo la altura promedio de cada sección y para cada variación del coeficiente de rugosidad, estos resultados se muestran en los anexos a, anexo b y anexo c, que corresponden a la morfología de grada, lecho plano y cascada respectivamente.

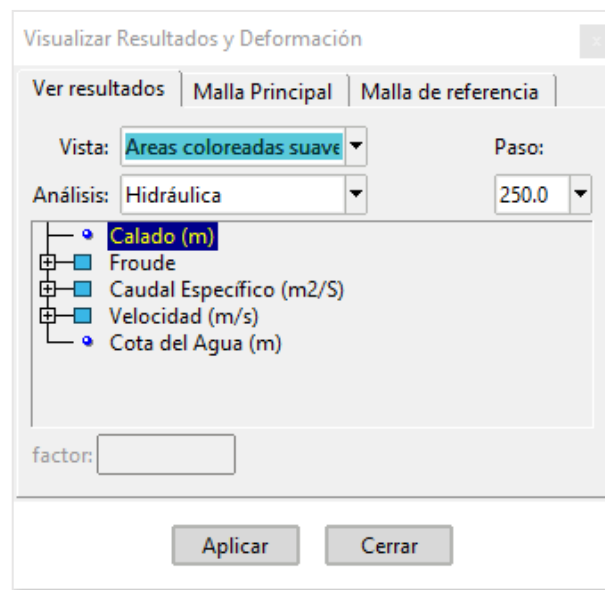


Figura 30. Ventana de resultados en Iber 2D

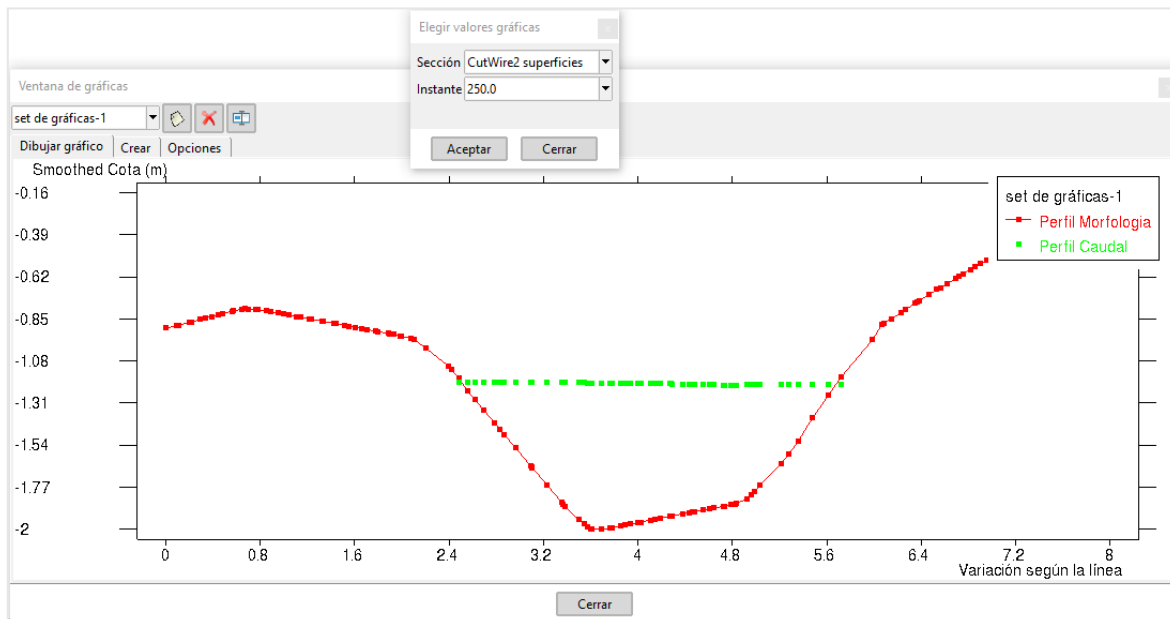


Figura 31. Perfil de morfología y caudal en Iber 2D

Capítulo 4

Resultados

4.1 Comparación de la eficiencia de diversas metodologías para estimar el coeficiente de resistencia.

El desempeño del modelo bidimensional depende en gran medida del tipo de ecuación empírica usada para predecir el coeficiente de rugosidad, pero de forma general los errores de RMSE normalizada son mayores en todas las metodologías para el nivel de caudal bajo. La Tabla 8 muestra el desempeño de cada metodología usada para estimar los coeficientes de resistencia, a través de los valores de la métrica estadística RMSE normalizada de la morfología grada, lecho plano y cascada, y subclasificados de acuerdo a los diferentes niveles de caudales. La Tabla 8 indica que, para todas las morfologías, las metodologías adimensionales tienen un mejor ajuste, obteniendo valores de RMSE normalizada que van desde 0.28 hasta 0.53, el resto de metodologías distan de dicho rango de valores. La metodología de Cedillo et al. (2021) posee métricas que se encuentran en los siguientes rangos: (a) grada 0.28 a 0.47, (b) lecho plano 0.46 a 0.52, y (c) cascada 0.34 a 0.41. El rango de métricas producidos por la metodología de Rickenmann & Recking (2011) comprende los siguientes intervalos: 0.29 a 0.47, 0.46 a 0.53 y 0.35 a 0.41 correspondientes a las morfología grada, lecho plano y cascada respectivamente. Y en la metodología de Ferguson (2007) los valores obtenidos varían en los siguiente rangos: (1) grada 0.28 a 0.46, (2) lecho plano 0.47 a 0.52 y (3) cascada 0.35 a 0.41. Las metodologías adimensionales para una misma morfología y mismo nivel de caudal arrojan resultados similares, por lo que usar una u otra no presenta cambios significativos. Las metodologías: Semilogarítmica (Bathurst, 1985), potencial (Bathurst, 2002), y de descomposición (Wohl, 1998), en general muestran valores de RMSE normalizada mucho mayores, solo por debajo de la metodología basada en fotografías, con un desempeño similar entre sí de acuerdo a la métrica usada, sin embargo algunos valores están dentro de rango de desempeño de las ecuaciones adimensionales. La metodología basada en fotografías presenta los valores superiores de RMSE normalizada para cada una de las morfologías y sus niveles de caudales, comprendiendo los siguientes rangos: 0.42 a 0.64, 0.61 a 0.78 y 0.52 a 0.53 para la zona de grada, lecho plano y cascada respectivamente. Solamente los valores 0.42 y 0.46 se encuentra con un desempeño similar a las ecuaciones adimensionales. Sin embargo, la metodología que mayor variación presenta entre el valor mínimo y máximo es la metodología de descomposición con un valor de 0.25 para la morfología grada.

Las ecuaciones empíricas de predicción con el segundo mejor desempeño después de las ecuaciones adimensionales varía de acuerdo a la magnitud del caudal y en algunos casos de

la morfología: (a) Caudales bajos: ecuación potencial con un RMSE que varía en el rango 0.47 a 0.57; (b) Caudales medios: métodos de descomposición para grada y cascada con un RMSE 0.34-0.43 y para lecho plano vuelve a ser la ecuación potencial con un valor de 0.46; (c) Caudales altos: en el caso de cascada y grada es el método de descomposición con RMSE que varían entre 0.35-0.41y en lecho plano es la potencial con una métrica de 0.43. En este punto del análisis se puede indicar que la metodología menos eficiente después de la basada en fotografías es la Semilogarítmica

Analizando desde el punto de vista de las morfologías. En general según la Tabla 8, se aprecia que los valores de los errores aumentan para todas las metodologías al evaluarlas en la morfología de lecho plano.

Tabla 8. Valores de la métrica RMSE normalizada de diferentes metodologías de estimación del coeficiente de resistencia para los casos en análisis

Metodología	Caudal	RMSE		
		Grada	Lecho Plano	Cascada
Cedillo y otros: Adimensional 3	Bajo	0.47	0.52	0.41
	Medio	0.28	0.48	0.35
	Alto	0.36	0.46	0.34
Rickenmann & Recking: Adimensional 2	Bajo	0.47	0.53	0.41
	Medio	0.29	0.48	0.35
	Alto	0.35	0.46	0.35
Ferguson: Adimensional 1	Bajo	0.46	0.52	0.41
	Medio	0.28	0.48	0.35
	Alto	0.35	0.47	0.35
Bathurst: Semilogarítmica	Bajo	0.58	0.64	0.49
	Medio	0.46	0.52	0.49
	Alto	0.44	0.47	0.48
Bathurst: Potencial	Bajo	0.56	0.57	0.47
	Medio	0.43	0.46	0.45
	Alto	0.42	0.43	0.45
Cowan: Descomposición	Bajo	0.59	0.71	0.50
	Medio	0.34	0.55	0.43
	Alto	0.35	0.47	0.41
Fotografías	Bajo	0.64	0.78	0.53
	Medio	0.46	0.66	0.53
	Alto	0.42	0.61	0.52

4.2 Consideración de la incertidumbre en la estimación del coeficiente de resistencia

En las Figuras 32, 33 y 34 se muestran los valores de la métrica RMSE normalizada para las morfologías grada, lecho plano y cascada respectivamente, cuando se varía el coeficiente de resistencia en: $\pm 10\%$ y $\pm 30\%$ (Anexo d, Anexo e y Anexo f), para todos los casos de estudio.

En cada Figura se tiene 3 bandas, formadas por la unión de los valores correspondientes a una variación del coeficiente de $+30\%$ y -30% . Para cada metodología, se aprecia 15 puntos, clasificados en 3 grupos de caudales (bajo, medio y alto), cada punto representa el error que se obtiene en la simulación hidrodinámica 2D de los modelos, para una determinada variación del coeficiente.

En la morfología grada (Figura 32), se observa, para todas las metodologías y magnitudes de caudal, que los errores producidos por las distintas variaciones del coeficiente de rugosidad se encuentran contenidas en una banda generada por las variaciones más grandes del coeficiente $\pm 30\%$ existiendo una única excepción que es la variación $+10\%$ en caudal alto. La tendencia general que siguen las gráficas es que, a medida que se incrementa el coeficiente de rugosidad, produce una disminución de RMSE normalizada, por otro lado, cuando se disminuye el coeficiente de rugosidad se incrementa el valor del error RMSE normalizada. Los anchos de banda generados por las diferentes metodologías para cada nivel de caudal son distintos, como se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9. Anchos de banda para morfología grada

Metodología	Amplitud de banda		
	Caudal bajo	Caudal medio	Caudal Alto
Adimensional 3	0.1	0.15	0.1
Adimensional 2	0.1	0.16	0.05
Adimensional 1	0.08	0.15	0.06
Semilogarítmica	0.06	0.09	0.08
Potencial	0.07	0.11	0.07
Descomposición	0.06	0.14	0.13
Fotografías	0.04	0.09	0.09

Por lo tanto, el ancho de banda del caudal medio es mayor, seguido por el de caudal bajo y alto que son similares entre sí. Sin embargo, el ancho de banda tiene una tendencia, para el caudal bajo y medio en donde las ecuaciones adimensionales generan un mayor ancho de banda, y para el caudal alto las ecuaciones adimensionales generan un menor ancho de banda que las demás expresiones empíricas en estudio. Además, se aprecia que el aumento del error tiende a ser simétrica a la disminución del error, para cada variación. Las metodologías: adimensional 1, 2 y 3 al evaluar para el caudal medio tienen un mejor desempeño con la variación del coeficiente de rugosidad $+30\%$. Y el máximo error (menor desempeño) es producido en todas las metodologías al evaluar para caudal bajo con la variación del coeficiente de rugosidad -30% .

En la morfología lecho plano (Figura 33) se presenta una tendencia similar a la morfología anterior en donde los errores se encuentran dentro de una banda generada por las variaciones

mayores de rugosidades +/- 30% y al aumentar la rugosidad la eficiencia de la predicción incrementa a excepción de las ecuaciones adimensionales 3 y 2 en caudal medio en donde los valores sin alterar poseen el valor RMSE más alto. Los anchos de banda generados por las diferentes metodologías para cada nivel de caudal son distintos, como se detalla en la Tabla 10.

Tabla 10. Anchos de banda para morfología lecho plano

Metodología	Amplitud de banda		
	Caudal bajo	Caudal medio	Caudal Alto
Adimensional 3	0.14	0.14	0.12
Adimensional 2	0.14	0.14	0.12
Adimensional 1	0.14	0.14	0.12
Semilogarítmica	0.09	0.12	0.12
Potencial	0.13	0.13	0.14
Descomposición	0.07	0.12	0.12
Fotografías	0.05	0.11	0.14

Los anchos de banda para los 3 niveles de caudales tienen una tendencia en la que las ecuaciones adimensionales generan una mayor amplitud a comparación de las demás metodologías en estudio. La metodología potencial desarrolla el mejor desempeño para toda la morfología lecho plano, con un valor de 0.36 para la variación +30% para el caudal alto, y la metodología basada en fotografías genera el menor desempeño de toda la morfología lecho plano con un valor de 0.81 para la variación del coeficiente de rugosidad en -30%.

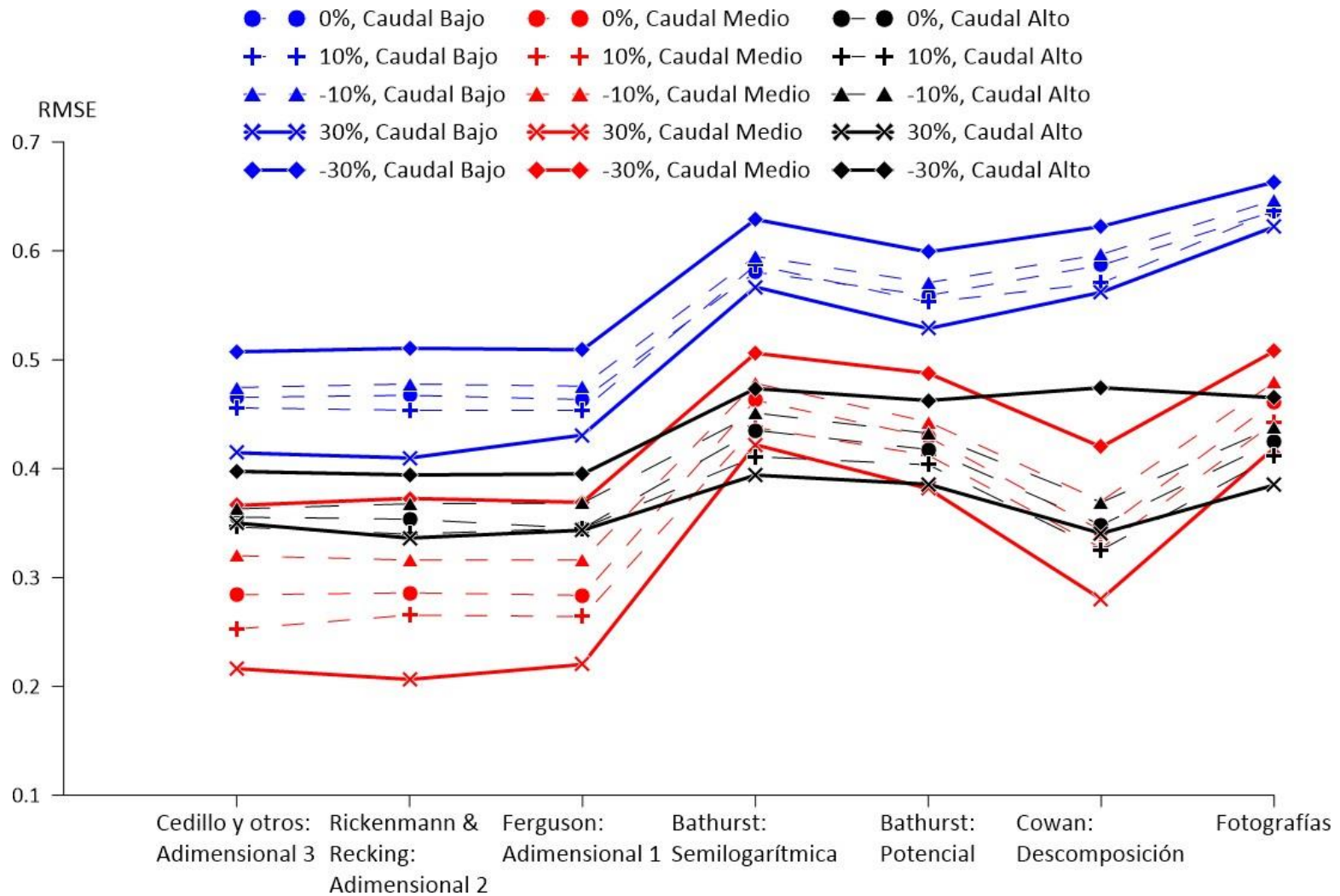


Figura 32. Valores de la métrica RMSE normalizada para cada variación del coeficiente de resistencia en la morfología de Grada

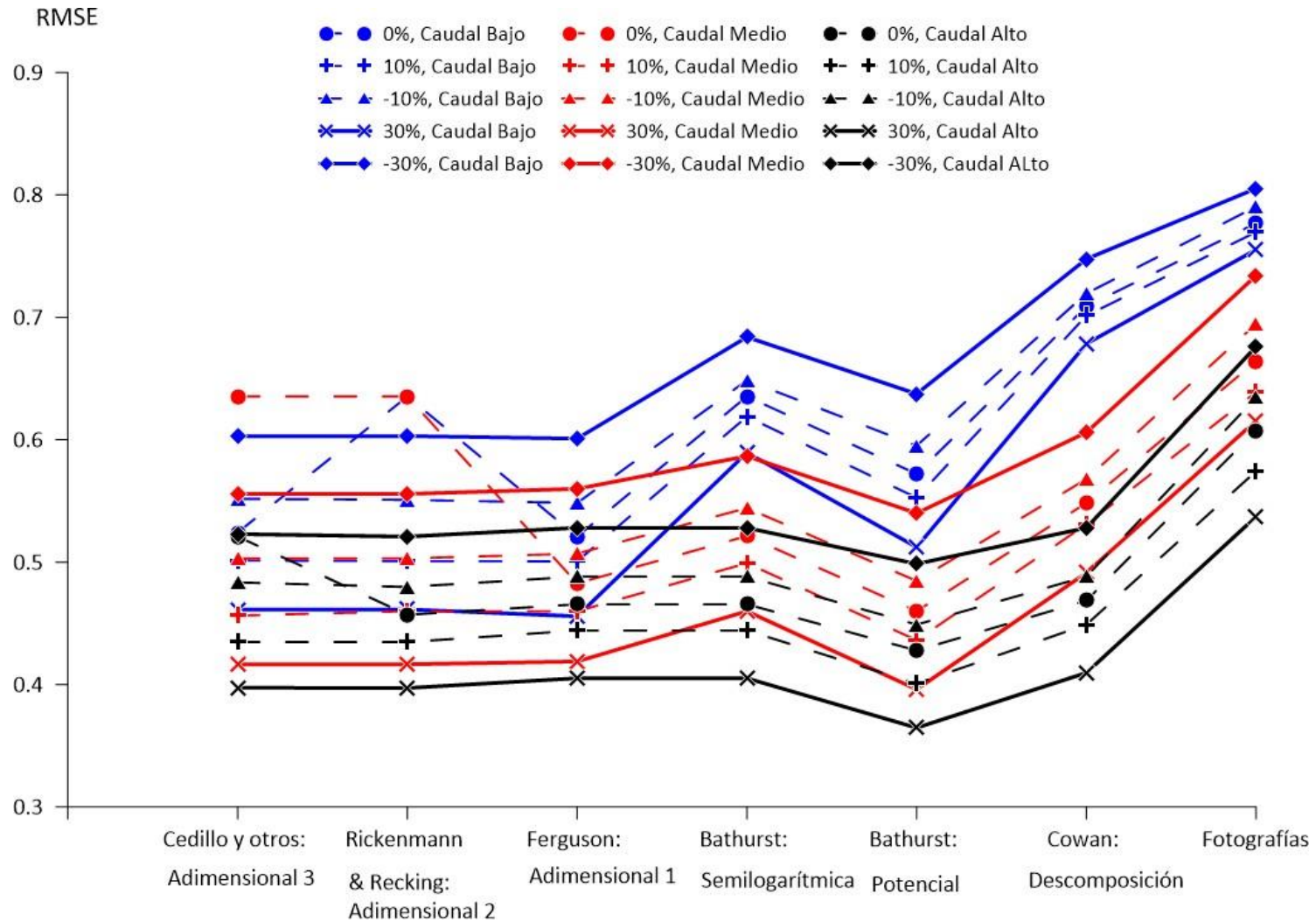


Figura 33. Valores de la métrica RMSE normalizada para cada variación del coeficiente de resistencia en la morfología de Lecho Plano

En la morfología cascada (Figura 34), la tendencia de banda se mantiene en todas la metodologías y magnitudes de caudal. Además, las ecuaciones más eficientes son las adimensionales al tener una banda ubicada en un RMSE normalizado más bajo repitiéndose la tendencia mostrada en la morfología grada. Los anchos de banda generados por las metodologías para cada nivel de caudal son distintos, como se detalla en la Tabla 11.

Tabla 11. Anchos de banda para morfología lecho plano

Metodología	Amplitud de banda		
	Caudal bajo	Caudal medio	Caudal Alto
Adimensional 3	0.07	0.11	0.12
Adimensional 2	0.06	0.11	0.11
Adimensional 1	0.07	0.11	0.12
Semilogarítmica	0.04	0.08	0.08
Potencial	0.04	0.08	0.10
Descomposición	0.04	0.09	0.11
Fotografías	0.03	0.06	0.07

La amplitud del ancho de banda en la morfología cascada tiene una tendencia al igual que la morfología lecho plano, las ecuaciones adimensionales generan una mayor amplitud de ancho de banda a comparación de las demás metodologías en estudio para todos los niveles de caudales. Las ecuaciones adimensionales desarrollan el mayor desempeño para la variación +30% al ser evaluadas para el caudal alto, y el menor desempeño es generado por la metodología basada en fotografías

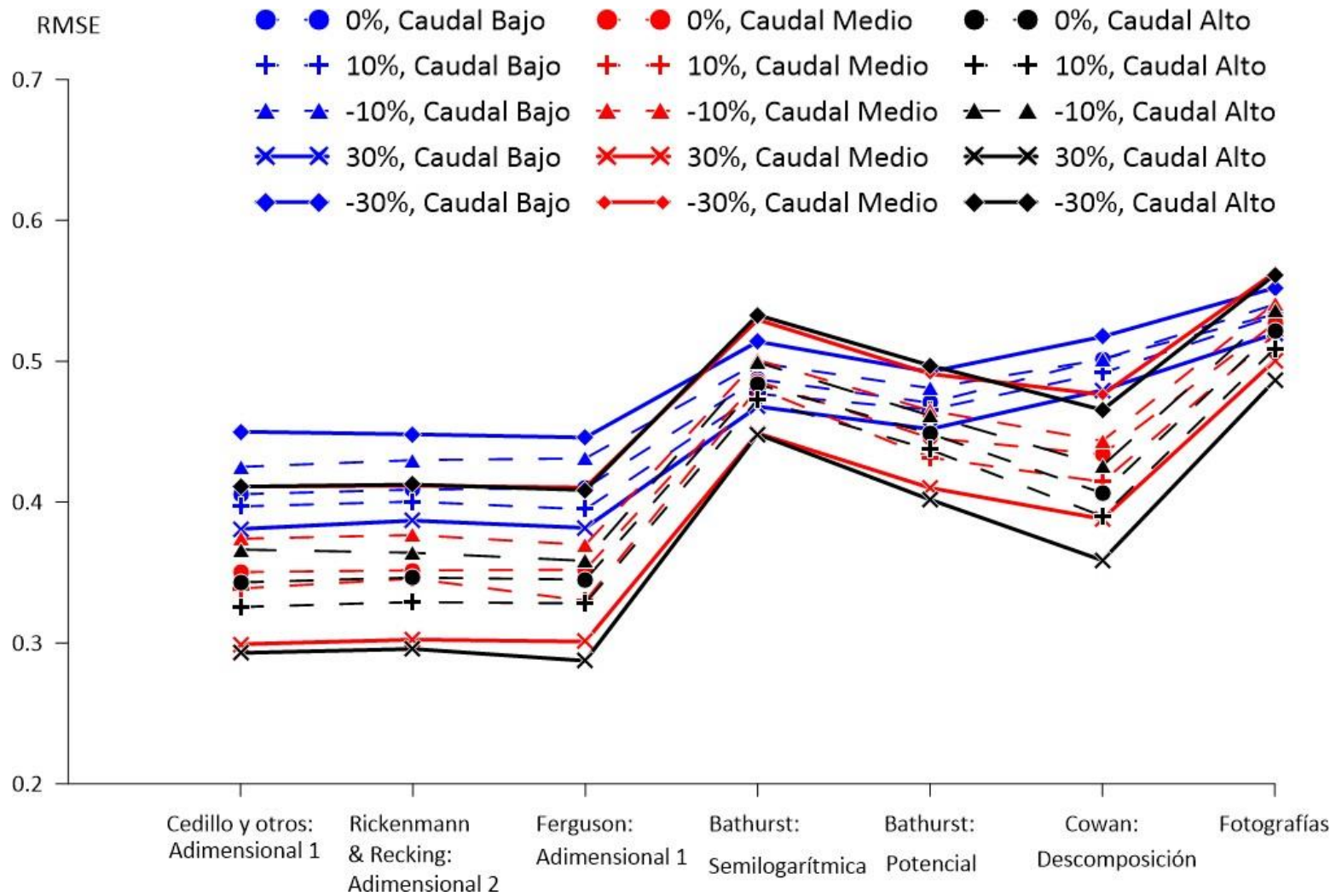


Figura 34. Valores de la métrica RMSE normalizada para cada variación del coeficiente de resistencia en la morfología de Cascada.

4.3 Dispersión de los valores

En las Figuras 35, 36 y 37 se visibiliza la dispersión que existe en los valores de la métrica RMSE normalizada, para las morfologías grada, lecho plano y cascada respectivamente al variar el coeficiente de resistencia +/- 10% y +/- 30% para diferentes magnitudes de caudal.

Se observa una notable variabilidad de la dispersión o sensibilidad, cuando los datos de una misma metodología, se comparan entre morfologías. En la morfología grada (Figura 35), los valores de todas las metodologías para los 3 caudales tienen una dispersión pequeña comparado con los valores de la morfología lecho plano (figura 36), a excepción de las ecuaciones adimensionales para el caudal medio donde aumenta la dispersión. En la Tabla 12 se presenta valores característicos que representan para todas las metodologías: 1) Amplitud entre el máximo y mínimo valor generadas por las gráficas de cajas y bigotes, 2) valores del rango Inter cuartil (RIQ), 3) valores que están ubicados fuera del RIQ y están cercanos a los cuartiles 1 y 3.

Tabla 12. Características principales de las dispersiones

Característica	Grada			Lecho plano			Cascada		
	Caudal bajo	Caudal medio	Caudal alto	Caudal bajo	Caudal medio	Caudal alto	Caudal bajo	Caudal medio	Caudal alto
Amplitud entre el máximo y valor mínimo	≤0.08	≤0.17	≤0.08	≤0.22	≤0.22	≤0.15	≤0.06	≤0.12	≤0.12
RIQ	≤0.04	≤0.08	≤0.04	≤0.01	≤0.01	≤0.01	≤0.04	≤0.04	≤0.04
Valores externos a RIQ	≤0.04	≤0.07	≤0.04	≤0.09	≤0.09	≤0.09	≤0.05	≤0.05	≤0.05

Adicional, la morfología grada (Figura 35) muestra: 1) Se tiene tres grupos identificados de acuerdo a su desempeño: a) Las metodologías adimensionales, tienen mejor desempeño a nivel de toda la morfología para los tres caudales. b) Con un desempeño por debajo del grupo a y similares entre sí; la metodología semilogarítmica, potencial y descomposición para el caudal bajo; semilogarítmica, potencial, descomposición y fotografías para el caudal medio y alto. c) Y con el menor desempeño para toda la morfología grada está la metodología basada en fotografías. 2) Las metodologías adimensionales tienen una mayor sensibilidad a la variación en los tres niveles de caudales, a diferencia de las demás metodologías que son sensibles a la variación entre caudal bajo y medio. Para la morfología lecho plano (Figura 36), los valores tienen una dispersión mucho más grande que en la morfología grada. Se presentan las siguientes características adicionales: 1) Forma tres grupos de acuerdo a su desempeño: a) Con mejor desempeño a nivel de toda la morfología para los tres niveles de

caudales están las metodologías adimensionales. b) Con segundo mejor desempeño, las metodologías semilogarítmica y potencial para caudal bajo; semilogarítmica, potencial y descomposición para los caudales medio y alto. c) Y por último con menor desempeño a nivel de la morfología, descomposición para el caudal bajo; y la de fotografías para todos los niveles de caudales. 2) Las metodologías adimensionales son menos sensibles a la variación de los caudales, a diferencia de las demás metodologías que varían notablemente entre si al ser evaluadas con caudal diferente. En la morfología cascada (Figura 37), los valores muestran una dispersión relativamente menor a la morfología grada (Figura 35), y mucho menor a la morfología lecho plano (Figura 36). Adicionalmente, la morfología cascada muestra: 1) Se clasifican en tres grupos claramente definidos en base a su desempeño: a) Con mejor desempeño a nivel de toda la morfología y para todos los niveles de caudales, las metodologías adimensionales. b) con un segundo mejor desempeño, la metodología semilogarítmica, potencial y descomposición. c) y con un menor desempeño a nivel de toda la morfología, la metodología basada en fotografías. 2) Solamente las metodologías adimensionales y de descomposición son las más sensibles al cambio de caudal entre bajo y medio. Luego de analizar las morfologías grada (Figura 35), morfología lecho plano (Figura 36) y morfología cascada (Figura 37), se observa que la morfología de cascada es menos sensible a la variación del coeficiente con respecto a los modelos de las morfologías de grada y lecho plano, siendo la morfología lecho plano la más sensible.

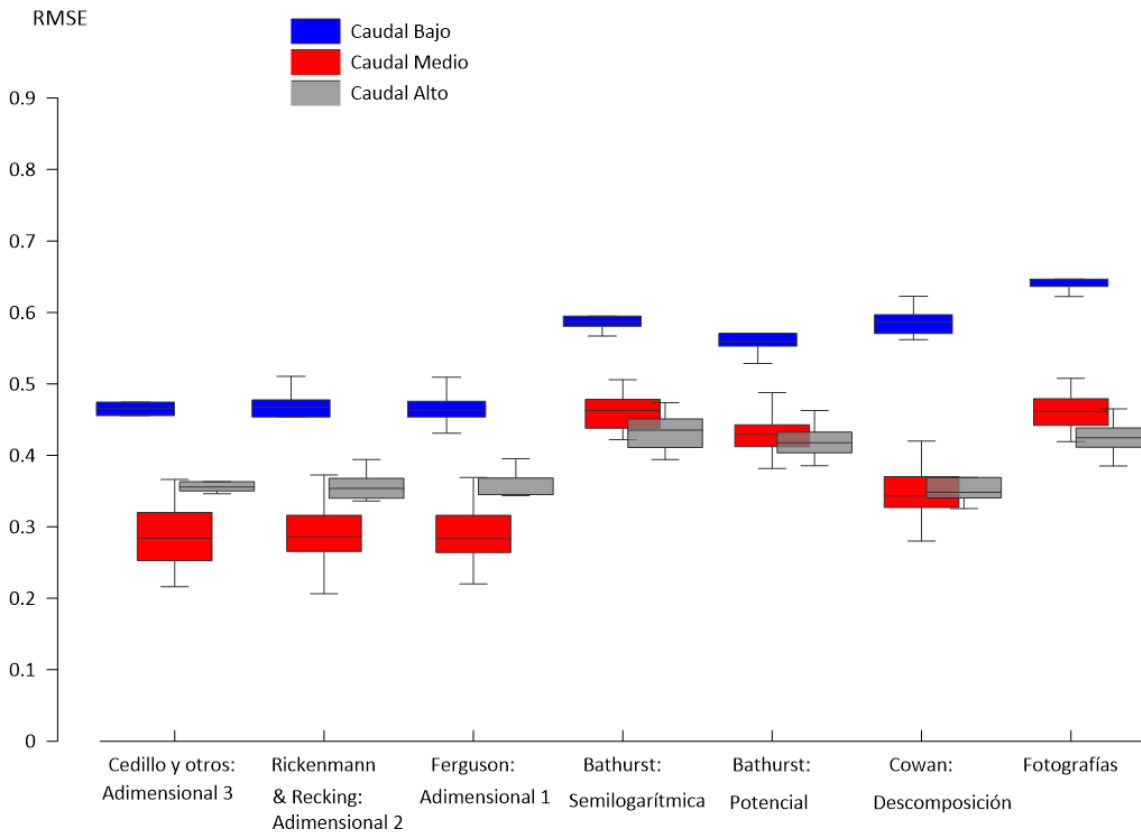


Figura 35. Dispersión de los valores de la métrica RMSE normalizada en la morfología de Grada

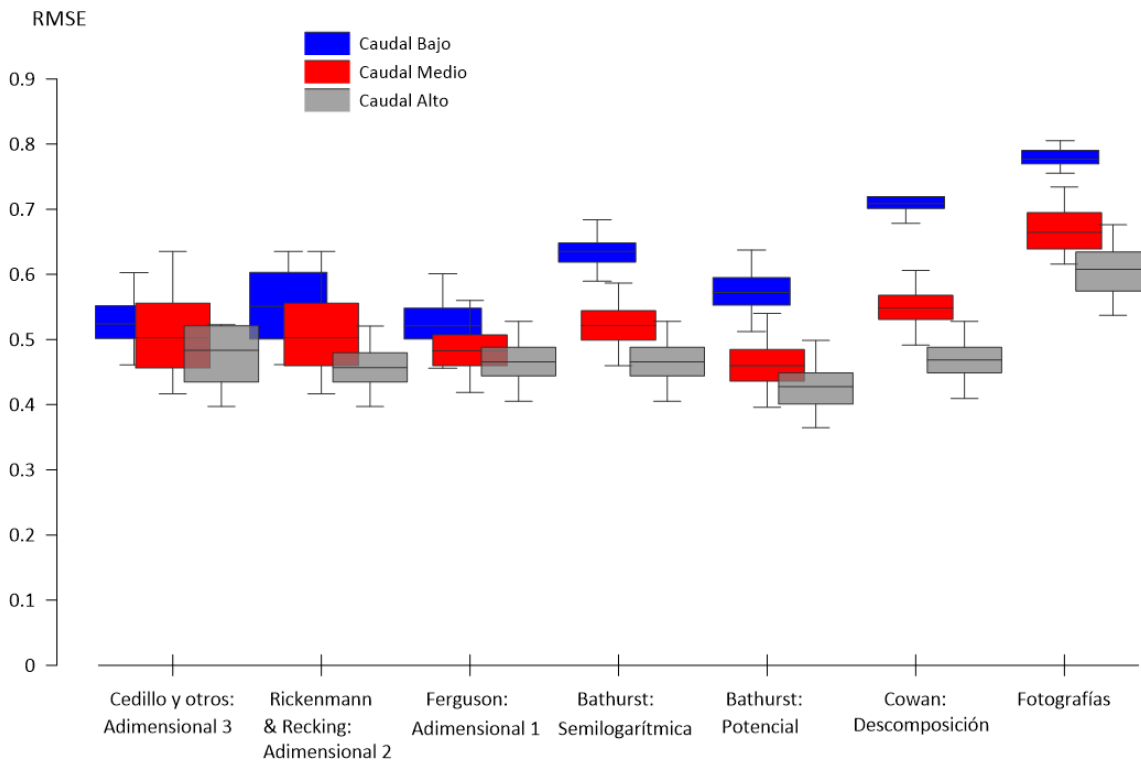


Figura 36. Dispersión de los valores de la métrica RMSE normalizada en la morfología de Lecho Plano

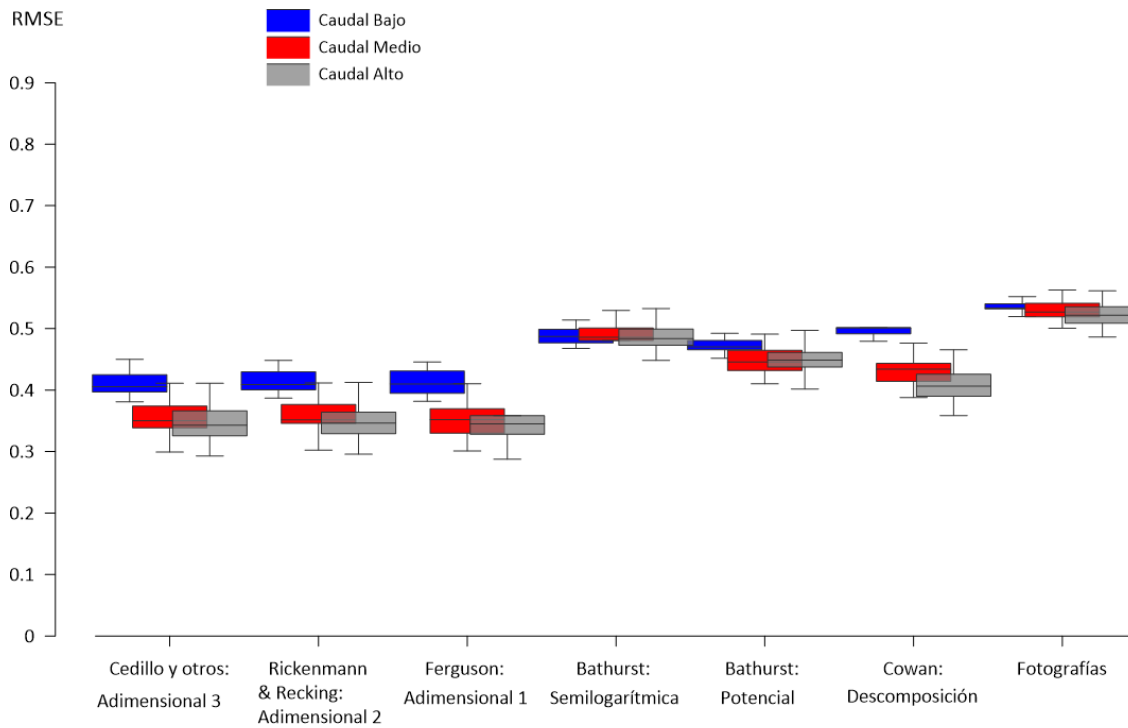


Figura 37. Dispersión de los valores de la métrica RMSE normalizada en la morfología de Cascada

Capítulo 5

Discusión

5.1 Eficiencia de las metodologías

En base a los resultados obtenidos en la capítulo anterior, las ecuaciones adimensionales obtuvieron un mejor desempeño para las tres morfologías en estudio (grada, lecho plano y cascada), usar una u otra ecuación adimensional para una misma morfología y nivel de caudal no tiene cambios significativos. La ecuación adimensional 3 se obtuvo del análisis realizado por Cedillo et al. (2021) para el río Quinuas en tres morfologías distintas (grada, lecho plano y cascada), donde se evaluó las velocidades medidas en campo y velocidades predichas a través distintas métricas entre las que se incluyó la métrica RMSE normalizada, en cuyo análisis las ecuaciones adimensionales tuvieron un desempeño satisfactorio. La ecuación adimensional 2 se obtuvo del estudio de Rickenmann & Recking (2011), es una modificación a través de un ajuste logarítmico que sustituyó la ecuación implícita de Ferguson, para la validación Rickenmann & Recking (2011) introdujo parámetros en términos de velocidad adimensional (U^{**}) y caudal unitario adimensional (q^{**}) y predijo las velocidades de flujo, donde encontró una máxima diferencia de $\pm 0.7\%$ entre las velocidades de flujo predichas y las velocidades de flujo medidas en campo, la cual considera aceptable para aplicaciones prácticas. La ecuación adimensional 1 se obtuvo del estudio de Ferguson (2007), aplicada en estudios de campo en riachuelos con diferentes morfologías (cascada, grada, lecho plano y poza- rápida) y pendientes de hasta 24%. El test de desempeño para la ecuación adimensional 1 fue realizada por Rickenmann & Recking (2011), en la que usó como parámetros de entrada el caudal de descarga y profundidad de flujo, y evaluó las velocidades de flujo calculadas versus las velocidades de flujo medidas en campo, y encontró que la ecuación de Ferguson (2007) tuvo un mejor desempeño general.

De igual forma basándonos en los resultados del capítulo anterior, la principal razón del bajo desempeño de las demás ecuaciones se debe a las condiciones asumidas en su origen de formulación. La ecuación potencial de Bathurst (2002) y la semilogarítmica de Bathurst (1985) fueron testeadas a partir de datos de campo de un río de montaña con pendientes menores al 5%; de acuerdo a la clasificación de las morfologías en la sección 2.2, donde la morfología grada tiene una pendiente 2% a 9%, la morfología lecho plano una pendiente de 2% a 5% y la morfología cascada con una pendiente de 3% a 20%, se asume que hubo pocas o nulas morfologías de cascada para la obtención datos de campo, siendo en su mayoría morfologías de lecho plano y de grada. La metodología de descomposición de Cowan (1956), fue verificado para una zona con vegetación y una altura de caudal de 0.80m a 1.5m, esto explicaría que se tenga errores mayores en caudales bajos, sin embargo, en este trabajo,

cuantifica de mejor manera en comparación al método de fotografías. Y finalmente en la metodología basado en fotografías de Barnes (1967), los coeficientes de resistencia fueron calculados para caudales pico mayores y su precisión depende de la habilidad del ingeniero, se puede asumir que presenta errores elevados, debido a que la resistencia estimada en este metodología es mucho menor a la realidad porque omite caudales bajos, o sumersión relativas bajas, y en consecuencia ignora efectos como la disipación de energía por turbulencias, saltos hidráulicos, vórtices, etc, que por ejemplo Bathurst (2002) si las considera en su estudio.

Al comparar los resultados de las evaluaciones de Cedillo et al. (2021) y Rickenmann & Recking (2011) realizados en 1D respectivamente con los resultados de las modelaciones hidrodinámicas 2D de este trabajo, se observa que la tendencia de las ecuaciones adimensionales es la misma en 1D y 2D, es decir las ecuaciones adimensionales son las que mejor desempeño presentan

Según Morvan et al. (2008), a pesar de que las modelaciones hidráulicas 1D y 2D usen el coeficiente de rugosidad, los fenómenos disipativos contenidos en dicho parámetro son diferentes en una modelación 1D que en una modelación 2D. Wohl (1998) realizó la validación de su estudio a través de una modelación hidráulica 1D usando el software HEC-2 (versión antigua de HEC-RAS), en dicha modelación el factor de fricción ó coeficiente de rugosidad representa el esfuerzo cortante ejercido por el lecho completo y por los límites de los bancos de flujo . Mientras que los resultados obtenidos para este trabajo realizado a través de la modelación hidráulica 2D usando el software Iber, el factor de fricción o coeficiente de rugosidad representa el esfuerzo cortante ejercido en la base de una columna vertical de agua

5.2 Variación del coeficiente de resistencia

De las metodologías usadas en este estudio para predecir el coeficiente de rugosidad, la de descomposición es la única en la que Wohl (1998) realizó un análisis de sensibilidad en 1D usando la herramienta HEC-2 para cinco morfologías diferentes con un rango de pendiente de 0.3% hasta 11.1%. En la misma, el coeficiente de rugosidad varió $\pm 10\%$ y $\pm 25\%$ y predijo caudales para cada variación respectivamente. Wohl (1998) concluyó que esta incertidumbre no es excesiva, y la sensibilidad se compara favorablemente a resultados previos. El estudio de Wohl (1998) usó tres morfologías de lecho plano, una morfología grada y una morfología cascada. La mayoría de los casos al variar los coeficientes de rugosidad $\pm 10\%$, el caudal estimado no presentó cambios en el estudio de Wohl (1998). Sin embargo, en el presente estudio, el error se amplifica para la variación -10% , y disminuye el valor del error para la variación $+10\%$. Para la variación $\pm 25\%$ en los coeficientes de rugosidad, los cambios al predecir el caudal fueron significativos; este comportamiento se puede comprar para nuestro

estudio, en la que los valores de los errores disminuyen al aplicar la variación + 30% en los coeficientes de rugosidad, y cuando se aplica la variación -30% en los coeficientes de rugosidad los errores se amplifican, creándose un rango de incertidumbre bien marcado para los errores.

5.3 Sensibilidad de los modelos a la variación del coeficiente de resistencia

En el presente trabajo, la morfología de lecho plano es la más sensible a la variación del coeficiente de rugosidad, seguida por la morfología grada, y la morfología cascada siendo la menos sensible. Wohl (1998) determinó que el cambio porcentual en la descarga estimada (sensibilidad), es inversamente proporcional a la pendiente del lecho y a la relación ancho/profundidad, y es directamente proporcional al coeficiente de rugosidad. Para el río Quinuas, los resultados de las modelaciones 2D denotan que la sensibilidad está inversamente relacionada con la pendiente del lecho. Para este trabajo, la morfología con mayor pendiente es la cascada, con una pendiente media de lecho de 8.50%, resultando esta morfología la menos sensible. De igual manera para este estudio, la morfología de lecho plano posee la menor pendiente media, con un valor de 3.16%, con un comportamiento más sensible a la variación de los coeficientes de rugosidad. Las morfologías en estudio poseen las siguientes relaciones promedio ancho/profundidad: 14.53 para la morfología grada, 19.67 para la morfología lecho plano y 13.71 para la morfología cascada, con estos datos se determina que la sensibilidad de los modelos para el río Quinuas no está ligado a la relación ancho/profundidad.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo de titulación se llevó a cabo la evaluación de desempeño de varias metodologías para obtener el coeficiente de rugosidad a ser usado en un modelo bidimensional. Distintos parámetros fueron considerados por las metodologías para la estimación de los coeficientes de rugosidad, tales como: caudal, pendiente de lecho, velocidad media del flujo, tamaño de grano (D_{84}), profundidad relativa (d/D_{84}), longitud de alcance, sección transversal.

La evaluación fue realizada, usando 315 coeficientes que representa la resistencia al flujo para las tres morfologías (grada, lecho plano y cascada) del río Quinuas; considerando los tres niveles de caudales (bajo, medio y alto) y las variaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 30\%$ producto de la incertidumbre generada. De tal forma, que para cada coeficiente de rugosidad se elaboró un modelo hidrodinámico en Iber 2D. Para determinar el desempeño de las metodologías, se usó la métrica estadística RMSE (Root Mean Square Error) normalizada, que se obtuvo de comparar la profundidad de agua medida en campo con la profundidad media de agua obtenida en el modelo hidrodinámico Iber 2D.

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que las ecuaciones de geometría hidráulica adimensional tienen un mejor desempeño para las tres morfologías analizadas. Usar una u otra metodología adimensional para una misma morfología y nivel de caudal no presenta cambios significativos. Según la eficiencia de las metodologías, de manera descendente se ubican de la siguiente manera: 1) Metodologías Adimensionales. 2) Metodología Potencial y Descomposición. 3) Metodología Semilogarítmica. 4) Metodología basada en fotografías.

Para la variación $+30\%$ de los coeficientes de rugosidad, las metodologías adimensionales alcanzan la máxima eficiencia en las morfologías grada y cascada; y para la morfología lecho plano la máxima eficiencia posee la metodología potencial. En general, para todas las metodologías el desempeño mejora al variar los coeficientes de rugosidad en sentido positivo, y existe una disminución del desempeño de las metodologías al ser evaluadas para variaciones negativas del coeficiente de rugosidad.

En base a la dispersión del desempeño de las metodologías, se concluye que para las distintas metodologías existe una mayor variación de sensibilidad entre el desempeño medido para caudal bajo y caudal medio; de tal forma, que el desempeño entre caudal medio y caudal alto tiene un comportamiento similar para la mayoría de las metodologías. Y, por último, se encontró que las morfologías con mayor pendiente caracterizada con una mayor resistencia

al flujo, son menos sensibles a la variación de los coeficientes de rugosidad; comparadas con las morfologías de menor pendiente caracterizado con valores de resistencia al flujo de menor valor.

Referencias

- Barnes, H. H., J. (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channels*. U.S. Geological Survey.
- Bathurst, J. C. (2002). *At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers*. 269, 11–26.
- Bathurst, James C. (1985). *Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers*. 1(4), 625–643.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Cedillo, S., Sánchez-Cordero, E., Timbe, L., Samaniego, E., & Alvarado, A. (2021). Resistance analysis of morphologies in headwater mountain streams. *Water (Switzerland)*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/w13162207>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chow, V. Te. (1994). *Hidraulica de canales abiertos*.
- Cowan, W. L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, 37(7), 473–475.
- Ferguson, R. (2007). *Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams*. 43(August 2006), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2006WR005422>
- López, R. (2004). Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (III). *Water Resources*, 3, 28–32.
- Morvan, H., Knight, D., Wright, N., Tang, X., & Crossley, A. (2008). *The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D , 2D and 3D numerical simulation models*. February 2013, 37–41. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2008.9521855>
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). *Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos . El Caso del Delta del Río Ranchería , Riohacha-Colombia 2D Hydraulic Flood Modeling in Data-Scarce Regions The Case of Ranchería River Delta , Riohacha-Colombia*. 29(4), 143–156.
- Rickenmann, D., & Recking, A. (2011). *Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers*

through a large field data set. 47(April). <https://doi.org/10.1029/2010WR009793>

Thome, C. R., & Zevenbergen, L. W. (1985). Estimating Mean Velocity in Mountain Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(4), 612–624. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1985\)111:4\(612\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1985)111:4(612))

Wohl, E. E. (1998). *UNCERTAINTY IN FLOOD ESTIMATES ASSOCIATED WITH ROUGHNESS COEFFICIENT.* February, 219–223.

Anexos

a. Alturas de los calados obtenidos en Iber 2D para la zona de Grada, donde s1 sección de control aguas arriba.

Método	Caudal	y_i (cm)														
		0%			+10%			-10%			+30%			-30%		
		s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3
Cedillo y otros	Bajo	7.17	12.83	19.00	7.20	13.04	19.41	7.08	12.51	18.79	7.75	14.12	20.66	6.89	11.45	17.83
	Medio	16.48	28.97	35.75	17.24	30.46	37.23	15.34	27.52	34.20	18.47	32.29	38.49	14.56	25.19	31.97
	Alto	21.34	35.42	40.10	22.29	36.98	41.40	20.78	34.71	39.38	23.74	40.70	43.66	18.48	31.44	36.56
Rickenmann & Recking:	Bajo	7.11	12.70	19.05	7.23	13.09	19.47	7.18	12.47	18.56	7.68	14.46	20.70	6.84	11.24	17.86
	Medio	16.30	28.65	36.04	17.02	29.90	36.46	15.66	27.75	34.09	18.38	33.45	38.99	14.12	25.02	31.84
	Alto	21.21	35.26	40.35	22.20	37.07	42.45	20.50	34.69	39.16	24.13	40.31	44.65	18.50	31.68	36.97
Ferguson	Bajo	6.92	12.83	19.31	7.26	13.24	19.33	7.18	12.45	18.69	7.55	13.97	19.89	6.72	11.60	17.69
	Medio	16.51	29.08	35.66	17.05	29.94	36.55	15.70	27.58	34.20	18.45	32.32	38.03	14.21	25.22	31.97
	Alto	21.17	35.70	41.79	22.19	36.90	41.59	20.37	34.33	38.99	24.14	40.38	43.64	18.48	31.81	36.95
Bathus: Semiográf-mica	Bajo	5.45	10.20	15.33	5.69	9.15	15.75	5.48	9.70	14.86	5.88	9.94	16.13	5.14	8.23	14.31
	Medio	12.10	21.44	27.30	12.70	22.75	28.22	11.72	21.11	26.30	12.90	23.27	29.26	11.63	19.63	24.84
	Alto	16.78	28.78	33.83	17.76	29.28	35.29	16.65	27.86	32.30	18.53	30.86	36.64	15.87	26.24	30.79
Bathus: Potencial	Bajo	6.13	10.09	16.33	6.41	10.29	16.37	5.81	9.89	15.98	6.40	11.12	17.11	5.44	9.04	15.24
	Medio	12.60	22.98	29.06	13.28	23.56	29.69	12.45	22.23	28.38	13.77	24.64	31.56	11.55	20.59	25.95
	Alto	17.86	29.81	34.68	18.66	30.74	35.51	17.29	29.10	33.65	19.79	32.65	36.89	16.23	26.97	31.53
Cowan: Descom. posición	Bajo	5.65	9.30	15.63	5.62	10.45	15.62	5.64	9.15	15.15	6.05	10.04	16.25	5.07	8.45	14.56
	Medio	15.11	25.89	33.34	15.67	27.00	33.51	14.19	25.11	31.97	16.64	29.11	35.89	12.98	23.26	29.41
	Alto	21.49	35.62	40.93	22.37	37.20	44.39	20.61	35.56	39.50	24.33	40.73	44.39	34.26	30.89	23.04
Fotografías	Bajo	4.80	7.99	14.28	4.87	8.26	13.96	4.63	7.76	13.96	4.95	8.55	14.56	4.51	7.40	13.32
	Medio	11.98	21.55	27.46	12.60	22.18	28.38	11.75	20.79	26.47	12.97	23.37	29.41	11.43	19.59	24.84
	Alto	17.46	29.29	34.27	17.64	29.89	35.54	16.82	28.01	33.34	18.56	31.71	37.89	16.23	26.46	31.24

b. Alturas de los calados obtenidos en Iber 2D para el sitio Lecho Plano, donde s1 sección de control aguas arriba.

Método	Caudal	y_i (cm)														
		0%			+10%			-10%			+30%			-30%		
		s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3
Cedillo y otros	Bajo	10.26	8.95	13.36	10.85	9.41	13.87	9.63	8.38	12.68	11.76	10.22	14.89	8.46	7.33	11.43
	Medio	21.46	19.07	23.21	22.22	20.08	24.18	20.35	18.00	22.39	23.94	22.20	25.39	18.19	15.49	20.55
	Alto	25.42	22.50	26.20	26.39	24.03	27.39	24.12	21.26	25.58	28.39	26.25	28.64	22.51	19.66	23.48
Rickenmann & Recking:	Bajo	10.22	8.91	13.32	10.81	9.38	13.95	9.73	8.41	12.63	11.73	10.26	14.86	8.41	7.29	11.48
	Medio	21.46	19.07	23.21	22.22	20.08	23.83	20.35	18.00	22.38	23.94	22.20	25.39	18.19	15.49	20.55
	Alto	25.64	22.76	26.41	26.39	24.03	27.39	24.33	21.36	25.79	28.60	26.47	28.41	22.56	19.78	23.58
Ferguson	Bajo	10.33	9.02	13.43	10.91	9.48	13.82	9.70	8.46	12.76	11.85	10.39	14.99	8.50	7.37	11.48
	Medio	21.31	18.90	23.07	22.22	20.08	23.83	20.20	17.83	22.23	23.95	22.05	25.27	18.03	15.33	20.38
	Alto	25.20	22.40	26.01	25.95	23.53	27.00	23.91	21.03	25.37	28.16	25.81	28.27	22.31	19.53	23.14
B a t h	Bajo	7.79	6.89	10.41	8.06	7.15	10.93	7.47	6.75	9.99	8.75	7.61	11.76	6.71	6.17	8.98

	Medio	19.55	17.11	21.80	20.51	18.18	22.53	18.54	16.03	21.04	22.07	19.92	24.05	16.87	14.27	19.32
	Alto	25.20	22.40	26.01	25.95	23.53	27.00	23.91	21.03	25.37	28.16	25.81	28.27	22.31	19.53	23.14
Bathus: Potencial	Bajo	9.19	7.99	12.14	9.70	8.37	12.59	8.62	7.49	11.62	10.54	9.17	13.66	7.74	6.84	10.35
	Medio	22.07	19.92	24.05	23.11	21.17	24.76	21.15	18.74	23.11	25.06	23.17	25.98	18.71	16.22	21.21
	Alto	27.05	24.59	27.36	28.38	26.03	28.46	25.73	23.27	26.80	30.67	28.39	29.49	23.61	20.45	24.88
	Bajo	6.24	5.78	8.20	6.37	5.93	8.41	6.06	5.61	7.87	6.76	6.27	9.17	5.55	5.26	6.91
Cowan: Descom posición	Medio	18.38	15.85	20.88	19.06	16.68	21.51	17.71	15.01	20.04	20.84	18.53	22.82	16.16	13.82	18.21
	Alto	24.98	22.13	26.01	25.73	23.27	26.80	23.90	21.03	25.36	27.94	25.58	28.09	22.31	19.53	23.14
Fotogra fías	Bajo	4.94	4.81	6.05	5.07	4.86	6.33	4.73	4.55	5.64	5.40	5.07	6.74	4.45	4.30	5.20
	Medio	14.44	12.50	14.54	14.92	12.96	16.41	13.78	11.98	12.35	15.67	13.60	17.75	11.79	11.13	10.45
	Alto	19.90	17.32	17.67	20.72	18.05	20.21	19.30	16.63	15.68	21.86	19.14	22.71	14.96	15.55	14.58

c. Alturas de los calados obtenidos en Iber 2D para la zona de Cascada, donde s1 es sección de control aguas arriba.

Metodología	Caudal	y _i (cm)																								
		n Manning					10%					-10%					30%					-30%				
		s1	s2	s3	s4	s5	s1	s2	s3	s4	s5	s1	s2	s3	s4	s5	s1	s2	s3	s4	s5	s1	s2	s3	s4	s5
Cedillo y otros	Bajo	11.32	10.89	35.15	45.02	19.92	10.88	11.38	35.94	45.38	20.29	10.84	9.97	34.33	44.21	18.92	11.01	11.66	37.44	45.96	21.76	10.02	21.06	48.23	53.19	31.83
	Medio	21.46	25.56	52.03	55.22	37.27	22.73	27.25	52.56	54.77	38.70	20.17	24.17	50.59	53.78	35.36	24.99	30.36	55.35	56.84	41.69	17.36	20.83	48.33	53.37	31.96
	Alto	25.21	30.93	55.17	58.70	41.47	26.78	32.35	56.70	59.05	43.52	24.19	28.92	55.51	56.85	39.30	28.83	36.17	59.74	59.87	47.49	20.64	25.17	52.55	55.31	35.43
Rickenmann & Recking:	Bajo	11.37	10.90	35.20	44.67	19.69	10.53	11.23	36.01	45.14	20.37	10.73	10.15	34.39	43.50	18.99	11.07	11.74	37.50	45.24	21.54	10.08	9.34	32.62	43.34	17.87
	Medio	21.37	25.67	51.94	55.01	37.16	22.57	26.80	52.40	54.05	38.49	19.99	24.42	50.42	53.33	35.13	24.85	30.18	55.20	56.55	41.50	17.26	21.06	48.23	53.19	31.83
	Alto	25.10	30.85	56.02	57.93	41.33	26.68	32.75	56.60	58.28	43.39	23.88	28.65	55.40	57.54	39.65	28.73	35.40	59.64	59.87	47.37	20.70	24.58	52.40	55.56	35.27
Ferguson	Bajo	10.92	11.51	35.38	44.11	19.90	10.55	11.16	36.18	45.69	20.57	11.05	10.73	34.54	42.74	19.18	11.11	11.93	37.70	45.55	21.77	10.04	9.42	32.73	43.58	17.74
	Medio	21.54	25.97	52.11	54.45	37.37	22.81	27.47	52.64	56.09	38.80	20.07	24.93	50.67	53.96	35.48	25.07	30.32	54.46	56.74	41.79	17.37	21.13	48.32	53.21	31.96
	Alto	25.31	31.03	55.32	58.08	41.61	26.88	33.00	56.80	58.06	43.66	24.19	28.91	55.50	58.24	39.80	28.92	36.15	59.83	60.93	47.02	20.78	25.29	52.70	55.51	35.59
Bathurst: Semilogarítmica	Bajo	7.89	7.29	29.96	42.72	16.56	8.39	7.64	30.35	43.13	17.13	7.38	7.30	29.58	41.87	15.98	8.70	7.92	31.14	43.54	17.04	6.72	6.46	29.42	41.31	15.07
	Medio	12.79	15.46	43.38	51.40	25.66	13.51	16.42	43.76	50.43	26.37	12.27	14.62	41.99	50.70	24.52	14.85	18.32	45.05	52.75	28.48	11.47	13.18	39.40	49.14	22.34
	Alto	16.16	19.06	45.59	53.43	29.55	16.70	20.44	46.93	52.99	30.72	15.60	18.46	44.02	52.48	28.00	18.23	21.67	48.86	54.75	32.22	14.19	16.85	41.59	51.31	23.56
Bathurst: Potencial	Bajo	8.96	8.60	31.36	42.48	17.04	8.86	8.41	31.86	42.72	17.72	8.36	8.12	30.86	42.18	16.64	9.62	9.10	32.85	42.87	18.44	7.69	7.12	29.80	42.45	16.32
	Medio	15.41	18.62	45.56	52.24	29.03	16.31	19.53	46.76	52.43	30.39	14.34	17.52	45.10	50.81	27.66	17.69	21.38	47.91	52.94	32.17	12.64	15.61	42.80	50.79	25.19
	Alto	18.37	22.05	49.02	54.08	32.40	19.12	22.98	50.47	54.24	33.29	17.18	21.15	48.04	53.89	31.22	21.15	26.08	53.13	55.71	36.09	15.73	18.55	44.21	52.55	28.29
Cowani: Descomposición	Bajo	7.47	6.95	29.64	41.69	16.08	7.93	7.15	30.00	42.18	16.61	7.42	6.92	29.90	41.84	15.53	8.50	7.95	30.70	42.25	17.30	6.80	6.21	29.16	41.32	14.72
	Medio	16.52	20.23	46.99	51.18	30.25	17.16	20.71	48.13	53.12	31.70	15.52	18.73	45.69	52.37	29.17	18.95	23.14	49.27	53.85	33.60	13.30	16.08	43.47	52.05	26.42
	Alto	21.03	25.13	52.99	55.67	35.92	22.19	26.62	53.53	56.45	37.22	19.78	23.94	51.30	54.79	34.10	24.31	30.08	55.07	57.33	40.04	17.20	20.67	48.03	53.33	31.22
Fotografías	Bajo	6.02	5.23	27.92	41.45	13.92	6.29	5.54	28.20	41.10	13.90	5.80	4.93	27.56	41.22	13.62	6.48	5.94	28.68	41.71	14.68	5.55	4.34	26.87	40.85	13.20
	Medio	11.46	13.20	39.39	49.73	22.34	11.80	13.65	40.57	49.64	23.05	11.10	12.96	38.20	48.33	21.37	12.51	14.96	41.99	50.24	24.52	10.61	11.71	35.91	48.48	18.43
	Alto	14.62	17.50	42.66	51.33	25.14	15.16	18.09	42.87	52.33	26.68	14.07	16.98	41.35	51.04	23.09	15.75	19.16	45.39	53.21	29.35	13.17	15.99	39.53	50.20	19.43

d. Valores de la métrica RMSE normalizada para cada variación del coeficiente de resistencia para la morfología grada.

Metodología	Caudal	RMSE				
		0%	10%	-10%	30%	-30%
Cedillo y otros: Adimensional 3	Bajo	0.47	0.46	0.47	0.41	0.51
	Medio	0.28	0.25	0.32	0.22	0.37
	Alto	0.36	0.35	0.36	0.35	0.40
Rickenmann & Recking: Adimensional 2	Bajo	0.47	0.45	0.48	0.41	0.51
	Medio	0.29	0.27	0.32	0.21	0.37
	Alto	0.35	0.34	0.37	0.34	0.39
Ferguson: Adimensional 1	Bajo	0.46	0.45	0.48	0.43	0.51
	Medio	0.28	0.26	0.32	0.22	0.37
	Alto	0.35	0.35	0.37	0.34	0.40
Bathurst: Semilogarítmica	Bajo	0.58	0.59	0.59	0.57	0.63
	Medio	0.46	0.44	0.48	0.42	0.51
	Alto	0.44	0.41	0.45	0.39	0.47
Bathurst: Potencial	Bajo	0.56	0.55	0.57	0.53	0.60
	Medio	0.43	0.41	0.44	0.38	0.49
	Alto	0.42	0.40	0.43	0.39	0.46
Cowan: Descomposición	Bajo	0.59	0.57	0.60	0.56	0.62
	Medio	0.34	0.33	0.37	0.28	0.42
	Alto	0.35	0.33	0.37	0.34	0.47
Fotografías	Bajo	0.64	0.64	0.65	0.62	0.66
	Medio	0.46	0.44	0.48	0.42	0.51
	Alto	0.42	0.41	0.44	0.38	0.47

e. Valores de la métrica RMSE normalizada para cada variación del coeficiente de resistencia para la morfología lecho plano.

Metodología	Caudal	RMSE				
		0%	10%	-10%	30%	-30%
Cedillo y otros: Adimensional 3	Bajo	0.52	0.50	0.55	0.46	0.60
	Medio	0.64	0.46	0.50	0.42	0.56
	Alto	0.52	0.43	0.48	0.40	0.52
Rickenmann & Recking: Adimensional 2	Bajo	0.64	0.50	0.55	0.46	0.60
	Medio	0.64	0.46	0.50	0.42	0.56
	Alto	0.46	0.43	0.48	0.40	0.52
Ferguson: Adimensional 1	Bajo	0.52	0.50	0.55	0.46	0.60
	Medio	0.48	0.46	0.51	0.42	0.56
	Alto	0.47	0.44	0.49	0.41	0.53
Bathurst: Semilogarítmica	Bajo	0.64	0.62	0.65	0.59	0.68
	Medio	0.52	0.50	0.54	0.46	0.59
	Alto	0.47	0.44	0.49	0.41	0.53

Bathurst: Potencial	Bajo	0.57	0.55	0.60	0.51	0.64
	Medio	0.46	0.44	0.48	0.40	0.54
	Alto	0.43	0.40	0.45	0.36	0.50
Cowan: Descomposición	Bajo	0.71	0.70	0.72	0.68	0.75
	Medio	0.55	0.53	0.57	0.49	0.61
	Alto	0.47	0.45	0.49	0.41	0.53
Fotografías	Bajo	0.78	0.77	0.79	0.76	0.81
	Medio	0.66	0.64	0.69	0.62	0.73
	Alto	0.61	0.57	0.63	0.54	0.68

f. Valores de la métrica RMSE normalizada para cada variación del coeficiente de resistencia para la morfología cascada

Metodología	Caudal	RMSE				
		0%	10%	-10%	30%	-30%
Cedillo y otros: Adimensional 3	Bajo	0.41	0.40	0.43	0.38	0.45
	Medio	0.35	0.34	0.37	0.30	0.41
	Alto	0.34	0.33	0.37	0.29	0.41
Rickenmann & Recking: Adimensional 2	Bajo	0.41	0.40	0.43	0.39	0.45
	Medio	0.35	0.35	0.38	0.30	0.41
	Alto	0.35	0.33	0.36	0.30	0.41
Ferguson: Adimensional 1	Bajo	0.41	0.39	0.43	0.38	0.45
	Medio	0.35	0.33	0.37	0.30	0.41
	Alto	0.35	0.33	0.36	0.29	0.41
Bathurst: Semilogarítmica	Bajo	0.49	0.48	0.50	0.47	0.51
	Medio	0.49	0.48	0.50	0.45	0.53
	Alto	0.48	0.47	0.50	0.45	0.53
Bathurst: Potencial	Bajo	0.47	0.47	0.48	0.45	0.49
	Medio	0.45	0.43	0.46	0.41	0.49
	Alto	0.45	0.44	0.46	0.40	0.50
Cowan: Descomposición	Bajo	0.50	0.49	0.50	0.48	0.52
	Medio	0.43	0.41	0.44	0.39	0.48
	Alto	0.41	0.39	0.43	0.36	0.47
Fotografías	Bajo	0.53	0.53	0.54	0.52	0.55
	Medio	0.53	0.52	0.54	0.50	0.56
	Alto	0.52	0.51	0.54	0.49	0.56