



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA
DE LA RUGOSIDAD DE FONDO EN LA CONFLUENCIA
DEL RÍO TARQUI CON EL RÍO YANUNCAY
PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO/A CIVIL**

AUTOR: FERNANDO JAVIER SARMIENTO PINEDA

MARCIA CAROLINA ZEA VÁZQUEZ

DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCIA

CUENCA - ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN.**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE LA RUGOSIDAD DE
FONDO EN LA CONFLUENCIA DEL RÍO TARQUI CON EL RÍO YANUNCAY

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO/A CIVIL**

AUTORES: FERNANDO JAVIER SARMIENTO PINEDA

MARCIA CAROLINA ZEA VÁZQUEZ

DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCIA

CUENCA – ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD

Fernando Javier Sarmiento Pineda y Marcia Carolina Zea Vázquez portadore(a)s de las cédulas de ciudadanía N° **1105792046** y **0107336620**. Declaramos ser autore(a)s de la obra: **“Caracterización Experimental y Numérica de la Rugosidad de Fondo en la Confluencia del Río Tarquí con el Río Yanuncay”**, sobre la cual nos hacemos responsables sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 31 de marzo de 2025

F: 
Fernando Javier Sarmiento Pineda
1105792046

F: 
Marcia Carolina Zea Vázquez
0107336620

Cuenca, 24 de marzo del 2025

Por medio del presente documento, certifico que en calidad de tutor he revisado las correcciones realizadas a las observaciones del Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL**, cuyo tema es **“CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE LA RUGOSIDAD DE FONDO EN LA CONFLUENCIA DEL RÍO TARQUI CON EL RÍO YANUNCAY”**, trabajo realizado por los estudiantes **FERNANDO JAVIER SARMIENTO PINEDA** y **MARCIA CAROLINA ZEA VÁZQUEZ**, cumpliendo en el documento final los cambios acorde a las observaciones realizadas por los revisores **ING. CARLOS JULIO CORDERO** e **ING. FRANCISCO DARQUEA**.



firmado electrónicamente por:
SANTIAGO AURELIO
OCHOA GARCIA

ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA PhD.
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

DEDICATORIA MARCIA CAROLINA ZEA VÀZQUEZ

Un logro es fruto del esfuerzo y la dedicación, pero el apoyo y motivación de quienes están a nuestro alrededor es la fuerza que nos impulsa a seguir adelante.

Dedico este trabajo a mis padres, **Geovanny** y **Marcia**, quienes con sacrificio, esfuerzo y amor han apoyado indudablemente mis sueños. Gracias por demostrarme cada día que con esfuerzo y perseverancia cualquier meta se cumple. Les agradezco cada consejo, su paciencia y el estar siempre junto a mí. A mis hermanos, **Dania** y **Emanuel**, son mi motivación constante para convertirme en mi mejor versión. Gracias por cada risa y pelea compartida, espero que este logro los inspire y demuestre que con esfuerzo todo sueño se vuelve una realidad.

A mis abuelitas, **Sonia** y **Orlanda**, ejemplos de resiliencia, bondad y trabajo. Gracias por su apoyo y afecto, por cada palabra de aliento que ha guiado mi camino y me ha mostrado que siempre hay razones para seguir luchando. A mis tíos, **Eddie** y **Lala**, de quienes aprendí que el cariño por los demás no debe limitarse. Gracias por su confianza en mí y su apoyo incondicional. Los consejos que me han dado, motivándome a seguir trabajando, son un regalo invaluable.

A mi abuelito **Urbano**, quien, aunque no está presente físicamente, permanece siempre en mi mente y corazón. Su legado de amor y trabajo duro vive en mis recuerdos y en cada paso que doy. Este logro es un homenaje a la memoria de quien desde un inicio confió ciegamente en mí y me ha acompañado, guiándome con su ejemplo y cariño.

Finalmente, a **Fernando**, mi compañero de tesis, con quien compartí largas horas de trabajo. Gracias por tu compromiso y paciencia durante este camino.

A todos ustedes, y a quienes han apoyado este sueño, les dedico este trabajo.

DEDICATORIA FERNANDO JAVIER SARMIENTO PINEDA

A mis padres, **Giovani** y **Sonia**, quienes con su ejemplo me han enseñado el valor de la honestidad, esfuerzo y constancia. Gracias por su amor incondicional, por brindarme siempre su apoyo en cada uno de mis proyectos, por sus palabras de aliento en los momentos de duda y por ser los cimientos sobre los que he construido mis sueños.

A mis hermanas, **Andrea** y **Sofía**, quienes siempre han estado presentes en mi vida. Gracias por su compañía, y por su forma de ver la vida, que muchas veces me ha enseñado más de lo que imaginan. Su presencia ha sido un recordatorio constante de que, pase lo que pase, siempre tendré con quién contar.

A **Emilia**, mi novia, por estar presente en cada etapa de este proceso, apoyándome incluso en los momentos más complicados. Gracias por tu forma de estar ahí, sin presiones, pero con firmeza, por tu paciencia, por las conversaciones que me ayudaron a ver las cosas con más claridad y por saber equilibrar con tu compañía los días de estrés.

A mis **amigos**, gracias por su apoyo, por sus consejos, por las horas de estudio compartidas y también por los momentos de distracción que ayudaron a despejar mi mente cuando más lo necesitaba.

A mi compañera de tesis, **Carolina**, con quien trabajé durante largas horas enfrentando retos, analizando datos y buscando soluciones. Gracias por tu compromiso, por la disposición para avanzar en cada etapa y por hacer que el proceso fuera más llevadero.

A todos ustedes, que de una u otra forma han dejado una huella en mi vida y en este proyecto, les dedico con todo mi corazón este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a la **Universidad Católica de Cuenca** por brindarnos la formación y los medios necesarios para llevar a cabo este trabajo. Su apoyo ha sido crucial para realizar esta investigación.

Agradecemos a nuestro tutor de tesis, **Ing. Santiago Aurelio Ochoa García** por su respaldo y orientación durante todo el proceso. Su compromiso y conocimiento resultaron fundamentales para llevar a cabo este estudio.

Reconocemos también la relevancia del proyecto de investigación formativa **“Caracterización experimental de la confluencia del río Yanuncay con el río Tarqui” (código PIFCV22-04)**, cuyo desarrollo nos permitió profundizar en el estudio hidrodinámico de esta confluencia.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a los responsables de la investigación **“Caracterización experimental y numérica de velocidad superficial de la confluencia del río Tarqui y Yanuncay aplicando la técnica LSPIV”**, en la cual tuvimos la oportunidad de participar en las campañas de aforo, de las cuales obtuvimos información necesaria para el desarrollo de nuestro estudio.

RESUMEN

En el análisis de cauces naturales, la rugosidad de fondo es un parámetro fundamental en su hidráulica fluvial por su influencia en la resistencia al flujo, la distribución de velocidades y el transporte de sedimentos. La confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, en Cuenca, cuenta con un reducido número de investigaciones centradas en su rugosidad de fondo, a pesar de encontrarse en una zona urbana con elevado nivel de tránsito. El presente estudio, se enfoca en la caracterización experimental y numérica de la rugosidad de fondo de dicha confluencia, crucial para una correcta modelación hidráulica del lecho y una predicción más exacta de su comportamiento. Se ha utilizado información de caudales y velocidades obtenidas de la aplicación de la técnica LSPIV en los puntos de control de este proyecto, evaluando distintos métodos para el cálculo de rugosidades. La modelación numérica se lleva a cabo con el software IBER 2D, un modelo bidimensional utilizado debido a su capacidad para representar la variabilidad espacial del flujo y la interacción entre las condiciones de fondo y velocidades superficiales. El funcionamiento del modelo se valida con el alto grado de correlación entre los resultados experimentales y numéricos de las velocidades en la confluencia, donde se presenciaron valores variantes, como consecuencia de su morfología. Además, se ha determinado el método para cálculo de rugosidades que representa las condiciones del sitio de mejor manera y su comportamiento en distintas circunstancias. Los resultados demuestran que el análisis por fotometría del material de fondo del lecho resulta efectivo para estimar la rugosidad de fondo y desarrollar modelos numéricos más confiables y precisos en áreas de confluencia.

Palabras clave: rugosidad, IBER 2D, velocidad, caudal, modelación bidimensional

ABSTRACT

In the analysis of natural watercourses, bottom roughness is a fundamental parameter in river hydraulics due to its influence on flow resistance, velocity distribution, and sediment transport. The confluence of the Tarqui and Yanuncay rivers in Cuenca has a limited number of studies focused on its bottom roughness, despite being located in an urban area with a high level of traffic. This study focuses on the experimental and numerical characterization of the bottom roughness of this confluence, which is crucial for a correct hydraulic modeling of the riverbed and a more precise prediction of its behavior. Flow rate and velocity data obtained through the application of the LSPIV technique at the control points of this project has been used, evaluating different methods for roughness calculation. Numerical modeling is conducted using the IBER 2D software, a two-dimensional model used due to its ability to represent the spatial variability of the flow and the interaction between bed conditions and surface velocities. The performance of the model is validated by the high degree of correlation between the experimental and numerical results at the confluence, where variable values were observed as a consequence of its morphology. Additionally, the roughness calculation method that best represents the site conditions and its behavior in different circumstances has been determined. The results demonstrate that photometric analysis of the riverbed material is effective for estimating bottom roughness and developing more reliable and accurate numerical models in confluence areas.

Keywords: roughness, IBER 2D, velocity, flow rate, two-dimensional modeling.

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCION	15
1.1. Antecedentes	16
1.2. Planteamiento del problema.....	18
1.3. Alcance y limitaciones del estudio	19
1.4. Relevancia e importancia del tema	21
1.5. Objetivos	22
1.5.1. Objetivo General.....	22
1.5.2. Objetivos Específicos.....	22
CAPITULO 2. MARCO TEORICO.....	23
2.1. Definición y clasificación de la rugosidad.....	23
2.2. Factores determinantes de la rugosidad del lecho.....	23
2.3. Relevancia de la rugosidad en la dinámica de los Ríos	25
2.4. Modelos existentes para la determinación de la rugosidad en cauces	27
2.4.1. Modelos empíricos.....	27
2.4.2. Modelos analíticos	27
2.4.3. Modelos numéricos	28
2.5. Revisión de las diferentes metodologías existentes	29
2.5.1. Ecuación de Manning	29
2.5.2. Ecuación de Chézy.....	30
2.5.3. Método de Cowan.....	30

2.5.4.	Método de Meyer-Peter y Müller	32
2.5.5.	Ecuación de Darcy-Weisbach	34
2.5.6.	Método de Colebrook-White	35
2.5.7.	Ecuaciones de Saint-Venant	36
2.6.	Aplicaciones específicas en confluencias de Ríos	37
2.6.1.	Estimación de la rugosidad y análisis preliminar	38
2.6.2.	Precisión en la dinámica del flujo	38
2.6.3.	Modelación de ondas dinámicas en la confluencia.....	38
2.6.4.	Ajuste en entornos naturales complejos.....	39
2.7.	Análisis dimensional aplicado a los regímenes de flujo	39
2.7.1.	Flujo subcrítico	39
2.7.2.	Flujo crítico.....	39
2.7.3.	Flujo supercrítico	40
CAPITULO 3. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS		41
3.1.	Diseño de la investigación experimental	41
3.1.1.	Selección y justificación del área de estudio: Confluencia Tarqui-Yanuncay ..	41
3.1.2.	Ubicación del área de estudio	42
3.1.3.	Enfoque y estrategia de muestreo	42
3.2.	Caracterización del lecho y fondo del Río	44
3.2.1.	Métodos de muestreo y análisis granulométrico.....	44
3.3.	Determinación y evaluación de coeficientes de rugosidad	48

3.3.1.	Rugosidad en el Río Tarqui	49
3.3.2.	Rugosidad en el Río Yanuncay	54
3.3.3.	Rugosidad en la Confluencia	58
3.4.	Validación y ajuste del modelo numérico.....	62
3.4.1.	Selección y fundamentación del Software IBER.....	62
	Fundamentos para la selección de IBER 2D.....	63
3.4.2.	Calibración de parámetros para la confluencia.....	64
	Modelación digital del terreno (MDT).....	64
	Estimación de los coeficientes de rugosidad.....	65
	Asignación de caudales de modelación.....	66
3.4.3.	Proceso de validación y verificación del modelo	68
3.4.4.	Condiciones de contorno.....	68
CAPITULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		76
4.1.	Características granulométricas y coeficientes de rugosidad obtenidos	76
4.1.1.	Río Tarqui Sección 1	76
4.1.2.	Río Tarqui Sección 2	78
4.1.3.	Río Yanuncay Sección 1	79
4.1.4.	Río Yanuncay Sección 2.....	81
4.1.5.	Confluencia Sección 1	82
4.1.6.	Confluencia sección 2.....	84
4.2.	Validación del modelo numérico en la confluencia	86

4.2.1.	Velocidades asignando rugosidades obtenidas del método de medición in situ	87
4.2.2.	Velocidades aplicando la rugosidad obtenida con el método de análisis granulométrico.	92
4.2.3.	Velocidades asignando rugosidad obtenidas del método de fotometría	97
4.3.	Variaciones y comportamiento de la rugosidad en diferentes condiciones	102
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		107
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		111
ANEXOS		118

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. (Fuente; Propia).....	42
Ilustración 2. Ejes principales de la partícula de áridos. Fuente: (Millanao, 2010)	45
Ilustración 3. Imagen por dron, granulometría Río Tarqui. (Fuente; Propia)	50
Ilustración 4. Zona de análisis Tarqui (Sección 1). (Fuente; Propia).....	51
Ilustración 5. Análisis mediante el software Tarqui (Sección 1). (Fuente; Propia)	52
Ilustración 6. Zona de análisis Tarqui (Sección 2). (Fuente; Propia).....	53
Ilustración 7. Análisis mediante el software Tarqui (Sección 2). (Fuente; Propia)	54
Ilustración 8. Imagen por dron, granulometría Río Yanuncay. (Fuente; Propia).....	55
Ilustración 9. Zona de análisis Yanuncay (Sección 1). (Fuente; Propia)	56
Ilustración 10. Análisis mediante el software Yanuncay (Sección 1). (Fuente; Propia).....	57
Ilustración 11. Zona de análisis Yanuncay (Sección 2). (Fuente; Propia)	57
Ilustración 12. Análisis mediante el software Yanuncay (Sección 2). (Fuente; Propia).....	58
Ilustración 13. Imagen por dron, granulometría Confluencia. (Fuente; Propia)	59
Ilustración 14. Zona de análisis Confluencia (Sección 1). (Fuente; Propia).....	60
Ilustración 15. Análisis mediante el software Confluencia (Sección 1). (Fuente; Propia)	60
Ilustración 16. Zona de análisis Confluencia (Sección 2). (Fuente; Propia)	61
Ilustración 17. Análisis mediante el software Confluencia (Sección 2). (Fuente; Propia)	62
Ilustración 18. Modelo digital del sitio analizado. (Fuente; Propia)	65
Ilustración 19. Delimitación de secciones en el cauce y áreas de inundación. (Fuente; Propia)	66

Ilustración 20. Campañas de aforo, medición de caudales y velocidades. (Fuente; Propia)..	67
Ilustración 21. Modelación bidimensional, Condiciones de entrada. (Fuente; Propia)	69
Ilustración 22. Modelación bidimensional, Condiciones de salida. (Fuente; Propia)	70
Ilustración 23. Modelación bidimensional, Elevación en la zona de salida. (Fuente; Propia)	71
Ilustración 24. Modelo Bidimensional, Mallado no estructurado. (Fuente; Propia).....	72
Ilustración 25. Ingreso manual de valores de rugosidad. (Fuente; Propia)	74
Ilustración 26. Asignación de la rugosidad al modelo. (Fuente; Propia)	74
Ilustración 27. Procesamiento de información. (Fuente; Propia).....	75
Ilustración 28. Curva granulométrica del Río Tarqui (Sección 1). (Fuente; Propia)	77
Ilustración 29. Curva granulométrica del Río Tarqui (Sección 2). (Fuente; Propia)	78
Ilustración 30. Curva granulométrica del Río Yanuncay (Sección 1). (Fuente; Propia).....	80
Ilustración 31. Curva granulométrica del Río Yanuncay (Sección 2). (Fuente; Propia).....	81
Ilustración 32. Curva granulométrica de la Confluencia (Sección 1). (Fuente; Propia)	83
Ilustración 33. Curva granulométrica de la Confluencia (Sección 2). (Fuente; Propia)	84
Ilustración 34. Velocidad aplicando rugosidad en medición in situ, Caudal de la primera campaña de aforo. (Fuente; Propia).....	87
Ilustración 35. Velocidades resultantes aplicando las rugosidades por método de medición in situ. (Fuente; Propia).....	88
Ilustración 36. Velocidad aplicando rugosidad por análisis granulométrico, Caudal de la primera campaña de aforo. (Fuente; Propia).....	93

Ilustración 37. Velocidades resultantes aplicando las rugosidades por método de análisis granulométrico. (Fuente; Propia)	93
Ilustración 38. Velocidad aplicando rugosidad por fotometría, Caudal de la primera campaña de aforo. (Fuente; Propia)	98
Ilustración 39. Velocidades resultantes aplicando las rugosidades por método de fotometría. (Fuente; Propia)	98
Ilustración 40. Velocidad aplicando rugosidad por fotometría, Caudal de la segunda campaña de aforo. (Fuente; Propia)	104
Ilustración 41. Velocidades, rugosidad por fotometría en caudal base 2. (Fuente; Propia).	105

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Valores para seleccionar mediante el método de Cowan. Fuente: (Martínez & Solano, 2020)	31
Tabla 2. Clasificación del tamaño de partículas. Escala de Wentworth. Fuente: (Bunte & Abt, 2001)	46
Tabla 3. Rugosidad del Río Tarqui (Sección 1). (Fuente; Propia).....	77
Tabla 4. Rugosidad del Río Tarqui (Sección 2). (Fuente; Propia).....	79
Tabla 5. Rugosidad del Río Yanuncay (Sección 1). (Fuente; Propia)	80
Tabla 6. Rugosidad del Río Yanuncay (Sección 2). (Fuente; Propia)	82
Tabla 7. Rugosidad de la Confluencia (Sección 1). (Fuente; Propia).....	83
Tabla 8. Rugosidad de la Confluencia (Sección 2). (Fuente; Propia).....	85
Tabla 9. Rugosidades establecidas por el método de Cowan y fotometría. (Fuente; Propia).	85
Tabla 10. Análisis estadísticos de correlación, Río Tarqui (medición in situ). (Fuente; Propia)	89
Tabla 11. Análisis estadísticos de correlación, Río Yanuncay (medición in situ). (Fuente; Propia).....	90
Tabla 12. Análisis estadísticos de correlación, Confluencia (medición in situ). (Fuente; Propia)	91
Tabla 13. Análisis estadísticos de correlación, Río Tarqui (medición Granulométrica). (Fuente; Propia).....	94
Tabla 14. Análisis estadísticos de correlación, Río Yanuncay (medición Granulométrica). (Fuente; Propia)	95

Tabla 15. Análisis estadísticos de correlación, Confluencia (medición Granulométrica). (Fuente; Propia)	96
Tabla 16. Análisis estadísticos de correlación, Río Tarqui (medición por fotometría). (Fuente; Propia).....	99
Tabla 17. Análisis estadísticos de correlación, Río Yanuncay (medición por fotometría). (Fuente; Propia)	100
Tabla 18. Análisis estadísticos de correlación, Confluencia (medición por fotometría). (Fuente; Propia).....	101

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Santa Ana de los Cuatro Ríos de Cuenca, ubicada en el sur del país, debe su nombre a los cuatro ríos que la atraviesan: Tomebamba, Tarqui, Yanuncay y Machángara. Si bien estos ríos pertenecen a la misma cuenca hidrográfica, el presente estudio se enfoca exclusivamente en la confluencia entre los ríos Tarqui y Yanuncay, debido a su importancia en la hidrodinámica de la zona. Los cuatro ríos en cuestión son ríos de montaña, caracterizados por su sinuosidad baja y un lecho compuesto por zonas profundas (pozos) y aguas someras, las cuales resultan visibles en épocas de sequía (Alvarez Rodas, Cordero Peña, & Neira Vásquez, 1994).

La rugosidad del fondo del lecho es uno de los parámetros que influye en su resistencia al flujo, la distribución de velocidades y en la interacción del agua con el ambiente, por lo tanto, es uno de los factores clave en su modelación hidrodinámica. Una mayor precisión de la rugosidad incrementa también la precisión de los modelos hidráulicos, así como el diseño y la operación de estructuras de drenaje, canales, presas, etc. Actualmente, la zona de análisis es uno de los sectores de la ciudad con tránsito elevado, y el número de estudios realizados para la determinación de la rugosidad de los cauces presentes se mantiene reducido (Fernández de Córdova Webster, Rodríguez López, & León Méndez, 2020).

En la presente tesis, se analizan diversas metodologías para el cálculo de la rugosidad de fondo en la confluencia de los ríos Yanuncay y Tarqui en el sector de la Universidad del Azuay, con el objetivo de identificar la metodología más precisa y factible para su aplicación en el modelo bidimensional del cauce. Los valores de rugosidad obtenidos en esta investigación se calculan por medio de imágenes y softwares de fotometría. Estos valores se comparan con los obtenidos por medio de mediciones in situ y análisis granulométricos, por parte del proyecto de investigación formativa de la Universidad Católica denominado

“Caracterización de la rugosidad de fondo de la confluencia de los ríos Yanuncay y Tarqui”, para comprobar su mayor cercanía a la realidad y verificarla por medio del modelo bidimensional con la obtención de velocidades que se compararan con las obtenidas en la investigación **“Caracterización experimental y numérica de velocidad superficial de la confluencia del río Tarqui y Yanuncay aplicando la técnica LSPIV”** en el 2024 por la Universidad Católica de Cuenca.

El incremento de estudios centrados en esta temática es indispensable debido al cambio constante de las características hidráulicas de los lechos presentes en los ríos por el gran interés y aporte que brindan a la ciudad y sus habitantes.

1.1. Antecedentes

Varios estudios han tratado la dinámica de los ríos y la rugosidad del lecho en los ríos Tarqui y Yanuncay, facilitando una mejor comprensión de los procesos hidrodinámicos en dicha confluencia. Fernández de Córdova y colaboradores (2020) estudiaron la influencia del coeficiente de rugosidad de Manning en las zonas de inundadas del río Yanuncay. Mediante el uso de un modelo hidráulico de régimen permanente y variado, analizaron cómo distintos valores de este coeficiente influyen en la ampliación de las áreas inundables durante sucesos de caudal elevado. Sus descubrimientos subrayan la relevancia de una evaluación adecuada de la rugosidad para anticipar y manejar zonas propensas a inundaciones (Fernández de Córdova Webster, Rodríguez López, & León Méndez, 2020).

Desde un enfoque más amplio, Graciela Zucarelli y Eduardo Ceirano (1982) llevaron a cabo una evaluación del coeficiente de rugosidad en el tramo medio del río Paraná, concluyendo que tanto la vegetación como la irregularidad del fondo del cauce influyen en la resistencia al flujo (Zucarelli & Blas Ceirano, 1982). Luis Ayala y su equipo (1995),

examinaron factores hidráulicos que influyen en la rugosidad de los ríos de montañosos, a través del análisis de 21 cauces en Colorado, Estados Unidos, determinando la correlación entre la granulometría del lecho, la pendiente y la resistencia al flujo (Ayala, López, & Marín, 1995).

Respecto a la metodología para calcular rugosidad, Jorge Fernández Cardona (2019) propone un modelo para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning, fundamentado en la altura del material sedimentario del cauce del río Achiguate-Guacalate, lo que posibilita una estimación más exacta basada en las propiedades sedimentarias del río (Fernandez Cardona, 2019). De manera similar, Gabriel Kaless (2017) evaluó la rugosidad equivalente en ríos Patagónicos con lecho de gravas, resaltando el impacto de la variabilidad granulométrica y las repercusiones del flujo en la morfodinámica de los ríos (Kaless, 2017).

Ramiro Marbello (2015), por su parte, trata la complejidad del flujo uniforme en canales naturales, evidenciando cómo la rugosidad fluctúa debido a la diversidad del lecho (Marbello Pérez, 2015). Además, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2021) llevó a cabo un estudio experimental acerca de la rugosidad absoluta en el río Bogotá, utilizando métodos de medición en terreno y calibración de dispositivos hidráulicos (Cundinamarca, 2021).

Estos estudios ofrecen un marco teórico más sólido, facilitando el contexto de la relevancia de la rugosidad de fondo en la confluencia del río Tarqui y Yanuncay, estableciendo los cimientos para este estudio y subrayando la importancia de seguir con análisis exhaustivos que faciliten la administración y planificación de los recursos hídricos en la zona.

1.2. Planteamiento del problema

El encuentro entre los ríos Tarqui y Yanuncay constituye un panorama complejo y estratégico en el ámbito de la hidrodinámica fluvial, a causa de las propiedades físicas y sedimentológicas únicas de ambos ríos. A pesar de su relevancia, este sector no ha sido analizado a profundidad respecto a uno de sus aspectos más importantes: la rugosidad del lecho fluvial. Este indicador, que establece la resistencia al desplazamiento del agua, influye directamente en factores esenciales como la rapidez del flujo, la circulación de sedimentos y la estabilidad del sistema hidráulico de la zona (Valdiviezo, 2018).

La ausencia de investigaciones concretas sobre la rugosidad en esta confluencia ha provocado un vacío de información que complica la modelación exacta de los flujos y restringe la ejecución de estrategias eficaces para la gestión y prevención de riesgos. Hasta el momento, los estudios efectuados en la zona se han centrado mayormente en el flujo o el traslado de sedimentos, pero han ignorado la descripción completa del lecho y su impacto en las dinámicas de los ríos. Este vacío resulta particularmente alarmante ya que la interrelación entre los sedimentos de ambos ríos, desde sedimentos de poca profundidad hasta cantos rodados, produce una rugosidad variada que puede modificar de manera significativa la hidrodinámica del lugar (Villacís, 2022).

La expansión urbana en las márgenes de estos ríos intensifica aún más la situación, aumentando los peligros de sedimentación, erosión y desbordamientos. Debido a este escenario se plantea la necesidad de caracterizar de manera detallada la rugosidad del lecho en la confluencia, no solo para entender las dinámicas presentes, sino también para anticipar posibles situaciones futuras que faciliten una administración sostenible del recurso hídrico (Valdiviezo, 2018).

Así, se presenta el principal desafío de este estudio: la ausencia de datos precisos y detallados acerca de la rugosidad del lecho en la convergencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, que obstaculiza la creación de modelos hidrodinámicos exactos, la reducción de riesgos y la correcta organización de infraestructuras hidráulicas en la zona.

1.3. Alcance y limitaciones del estudio

Este estudio tuvo como objetivo analizar la rugosidad del lecho fluvial en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, un aspecto clave para comprender la hidrodinámica de esta zona estratégica. Para ello, se aplicaron diversas técnicas para estimar el coeficiente de rugosidad de Manning, abarcando tanto métodos tradicionales como herramientas modernas que permitieron una caracterización precisa y detallada del lecho fluvial.

Las actividades contempladas dentro del alcance incluyeron:

- **Mediciones en campo:** Se llevo a cabo un análisis granulométrico utilizando técnicas de tamizado, complementadas con la medición directa de los tamaños de las rocas en sitio para obtener datos precisos sobre las características sedimentarias.
- **Fotometría y análisis aéreo:** Se emplearon fotografías capturadas con drones durante varias campañas de campo, lo que permitió generar modelos bidimensionales del lecho y evaluar su morfología de manera integral.
- **Calibración y modelación:** Los datos recopilados fueron procesados en programas especializados, como IBER, para realizar una calibración manual de la rugosidad, y se integraron con herramientas SIG (Sistema de Información Geográfica) como ArcGIS para analizar la distribución espacial de los parámetros evaluados.

El resultado de este análisis no solo mejoró la comprensión de las características hidráulicas de la confluencia, sino que también proporcionó información clave para el diseño de modelos hidrodinámicos aplicables en la gestión de recursos hídricos, la prevención de inundaciones y la planificación de infraestructuras.

Aunque el enfoque es integral, existieron ciertas limitaciones que pudieron afectar el desarrollo del estudio:

- Restricciones durante la toma de datos: En temporadas de lluvias intensas, el aumento del caudal en la confluencia dificultó la realización de aforos y mediciones directas en campo, lo que limitó la cantidad de datos obtenidos.
- Variabilidad estacional: Se identificó que los parámetros hidráulicos, incluida la rugosidad del lecho, presentaron cambios significativos a lo largo del año debido a fluctuaciones en el caudal y el transporte de sedimentos (Valdivieso, 2018).
- Heterogeneidad sedimentaria: La combinación de sedimentos finos del Yanuncay y materiales más gruesos del Tarqui generó una distribución irregular en el lecho, lo que dificultó la generalización de los resultados (Villacís, 2022).
- Dependencia tecnológica: La precisión de los análisis dependió en gran medida de la calidad de las imágenes capturadas con drones y del correcto funcionamiento de las herramientas SIG y software de modelación utilizados. En algunas campañas de campo, las condiciones climáticas afectaron la captura de datos óptimos.

A pesar de estas restricciones, el estudio proporcionó una base sólida para comprender las dinámicas fluviales de la confluencia, contribuyendo al desarrollo de soluciones prácticas para la gestión y planificación hídrica en la región.

1.4. Relevancia e importancia del tema

El estudio de la rugosidad del lecho fluvial en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay no solo aborda un problema técnico de alta complejidad, sino que también introduce metodologías innovadoras que marcan un avance significativo en la investigación hidrodinámica. Este análisis, enfocado en una zona estratégica de la ciudad de Cuenca, permite conectar el conocimiento técnico con aplicaciones prácticas, generando soluciones sostenibles que benefician tanto a la gestión hídrica como a las comunidades locales.

La introducción de herramientas avanzadas, como la fotometría mediante drones y la modelación numérica en IBER, combinadas con análisis granulométricos tradicionales, representa un salto cualitativo en la caracterización de la rugosidad fluvial. Estas técnicas no solo ofrecen una mayor precisión en la medición de parámetros clave, sino que también abren nuevas posibilidades para explorar la relación entre las características del lecho y las dinámicas del flujo. Al integrar estos métodos, el estudio sienta un precedente en el uso de enfoques híbridos para analizar sistemas fluviales complejos.

Además, la utilización de softwares SIG como ArcGIS para mapear y visualizar los datos recolectados contribuye a una interpretación más detallada de la interacción entre los sedimentos de ambos ríos. Esta innovación permite superar las limitaciones de estudios previos, que se habían centrado en análisis más generales, y establece una base metodológica replicable en otras regiones con características similares (Villacís, 2022).

En cuanto a su importancia práctica y aplicada, los datos obtenidos ayudarán a mejorar los modelos hidrodinámicos utilizados para prever inundaciones, optimizar la gestión de caudales y diseñar canales de protección más eficientes. Asimismo, estas nuevas técnicas permiten no solo identificar riesgos, sino también proponer estrategias de mitigación más eficaces y adaptadas a las condiciones específicas de la confluencia.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Caracterizar la rugosidad de fondo en la confluencia del río Tarqui y río Yanuncay para evaluar el impacto en sus variables hidrodinámicas, utilizando técnicas experimentales y numéricas.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Analizar el material de fondo en diferentes puntos de control en la confluencia del río Tarqui con el río Yanuncay con base a la caracterización del material del lecho del río y evaluar su relación con la rugosidad.
- Evaluar diferentes metodologías que existen para determinar la rugosidad del material de fondo del cauce que serán variables de entrada de modelos hidrodinámicos bidimensionales aplicados a la zona de estudio.
- Implementar un modelo numérico utilizando la herramienta computacional IBER 2D, para obtener características típicas de la confluencia estudiada.

CAPITULO 2. MARCO TEORICO

2.1. Definición y clasificación de la rugosidad.

Dentro de la ingeniería civil, específicamente al hablar del área hidráulica, la rugosidad del lecho de un río es un parámetro crítico que influye directamente en el diseño y comportamiento de infraestructuras hidráulicas. La rugosidad representa la resistencia que el lecho del río presenta al flujo del agua, la cual está definida por su material de fondo, es decir, sedimentos, vegetación presente y su geometría irregular. (Gonzalez, Santiago, Muñoz, & Arevalo , 2020)

2.2. Factores determinantes de la rugosidad del lecho

La rugosidad de un canal abierto está determinada por el material que compone sus paredes y fondo, así como por la vegetación y las condiciones presentes en el entorno. Estos factores que resultan determinantes en la rugosidad son: rugosidad superficial, irregularidad del canal, alineamiento del canal, obstrucción, tamaño y forma del canal, nivel y caudal, cambio estacional, sedimentación, socavación y material de suspensión. (Gonzalez, Santiago, Muñoz, & Arevalo , 2020)

La rugosidad superficial es aquella originada por la presencia de material granular en el lecho del canal, lo cual genera una resistencia al flujo que depende del tamaño del grano; mientras más grueso sea el material, mayor será el retraso en el flujo. A velocidades elevadas, este tipo de rugosidad contribuye a la transición del flujo de un régimen laminar a uno turbulento. (Gonzalez, Santiago, Muñoz, & Arevalo , 2020)

Por su parte, la irregularidad del canal influye tanto en el perímetro mojado como en la sección transversal a lo largo del canal, alterando su forma y tamaño, puede ser causada por factores como la erosión, el transporte de sedimentos, y cambios en la morfología del lecho, entre otros fenómenos geomorfológicos que afectan el comportamiento hidráulico del canal. (Gonzalez, Santiago, Muñoz, & Arevalo , 2020)

El alineamiento del canal depende directamente de la existencia de curvas suaves o bruscas que reducen o aumentan el valor de “n”, respectivamente (Chow V. T., 1994).

La presencia de obstrucciones es lo más común dentro de canales con hojas, troncos y demás elementos que aumentarían el coeficiente a mayor cantidad de obstrucciones (Chow V. T., 1994).

El factor de tamaño y forma del canal está influenciado por el radio hidráulico del canal, lo que puede aumentar o disminuir el valor de “n” con base en la condición del canal (Chow V. T., 1994).

El aumento del nivel y caudal en un canal tiende a reducir el coeficiente de Manning, mientras que una disminución en estas condiciones produce el efecto contrario. Cuando el caudal es demasiado elevado, pueden ocurrir inundaciones en áreas donde el valor de “n” es mayor que el del canal principal. Sin embargo, si el lecho y los valles de inundación presentan una configuración regular y uniforme, el coeficiente de rugosidad se mantiene constante, evitando variaciones significativas en la resistencia al flujo. (Gonzalez, Santiago, Muñoz, & Arevalo , 2020)

El cambio estacional, dependiente de la época del año, provoca el crecimiento de plantas acuáticas, hierba, maleza, etc. en el canal, por lo que el valor de “n” puede aumentar durante el invierno y disminuir durante el verano. (Martínez & Solano, 2020)

La sedimentación tiene la capacidad de transformar un canal altamente irregular en uno con mayor uniformidad, reduciendo el valor del coeficiente de rugosidad. Por el contrario, la socavación tiende a elevar este valor al volver más irregular el canal (Martínez & Solano, 2020).

El material en suspensión, en movimiento o reposo, consume energía y provocara una pérdida de altura elevando la rugosidad del canal (Martínez & Solano, 2020).

2.3.Relevancia de la rugosidad en la dinámica de los Ríos

Uno de los elementos más importantes que afecta a la dinámica fluvial y las interacciones entre el flujo de agua y el lecho del cauce es la rugosidad de los ríos. El parámetro se enfoca principalmente en el coeficiente de rugosidad de Manning (n), que valora la resistencia al flujo causado por las irregularidades del lecho, como la vegetación, la granulometría y las obstrucciones geomorfológicas existentes en el cauce. La rugosidad no sólo regula la velocidad del flujo y la energía disponible, sino que también afecta el movimiento de sedimentos, la erosión, la deposición y la estabilidad del cauce.

Como se menciona anteriormente, una de las consecuencias más importantes de un lecho de río desigual es la reducción de la velocidad del agua. Cuando el agua fluye sobre una superficie irregular, el aumento de la fricción debido a las partículas de sedimentos y al terreno irregular hace que la velocidad del agua disminuya. Este fenómeno es especialmente importante en canales naturales, donde la rugosidad puede variar y es difícil de cuantificar con exactitud. Además, la rugosidad afecta directamente la disipación de energía de una corriente, lo que a su vez afecta su capacidad para transportar sedimentos (Knight, 1996).

En áreas de alta rugosidad y mayor fricción, esto afecta la capacidad del flujo para mover sedimentos finos, provocando que estos sedimentos se depositen en áreas específicas

del canal (Wilcock, 2003). Este fenómeno es de gran importancia para la evolución geomorfológica del río, debido a que la acumulación de sedimentos cambia las características del lecho del río, provocando nuevas formaciones como bancos de arena, islas fluviales y cambio de profundidad del lecho del río.

En cuestiones de erosión, está estrechamente relacionada con el desnivel del lecho del río. Los canales de baja rugosidad, con material más fino o menos obstrucciones geomórficas, permiten un flujo más rápido, lo que puede provocar una mayor erosión de las riberas del río. Por el contrario, en zonas con mayor rugosidad, la energía del flujo se disipa más rápidamente, reduciendo así el potencial erosivo del río y protegiendo las riberas, reduciendo así el desgaste del cauce (Parker, 1998). Por tanto, la rugosidad actúa como un factor regulador natural que regula los procesos de erosión y sedimentación en el sistema fluvial.

En el campo de la modelación hidráulica, la rugosidad del canal es un factor clave en los modelos numéricos que predicen el comportamiento de los ríos. Herramientas como IBER permiten variar los coeficientes de rugosidad para simular diferentes escenarios de corrientes, transporte de sedimentos, etc. (Bladé, 2012).

Por último, cabe señalar que la rugosidad también tiene un impacto significativo en los ecosistemas acuáticos. Las irregularidades en los lechos de los ríos los profundizan creando microhábitats esenciales para la biodiversidad. Estos hábitats permiten que las especies acuáticas busquen refugio en áreas a un ritmo más lento, lo cual es importante para su supervivencia y reproducción (Clifford, 1992). Por tanto, la rugosidad no sólo es importante desde el punto de vista hidráulico sino también desde el punto de vista ecológico, ya que contribuye a la protección y desarrollo sostenible de los ecosistemas fluviales.

2.4. Modelos existentes para la determinación de la rugosidad en cauces

La caracterización de la rugosidad de un cauce puede abordarse desde distintos enfoques teóricos y modelos conceptuales, los cuales se clasifican generalmente en tres categorías principales: experimentales (incluyendo modelos empíricos), analíticos y numéricos. Cada uno de estos enfoques ofrece una metodología particular y se selecciona en función de las condiciones específicas del cauce y los objetivos de la investigación.

2.4.1. Modelos empíricos

Los modelos empíricos se basan en datos obtenidos a partir de experimentos y observaciones de campo para desarrollar fórmulas que relacionan la rugosidad con las características geomorfológicas del cauce. Un ejemplo ampliamente reconocido es la ecuación de Manning, que introduce el coeficiente de rugosidad "n", empleado para estimar la velocidad del flujo en función de la pendiente y la sección transversal del cauce. Esta ecuación ha sido muy utilizada en hidrología debido a su simplicidad y a su versatilidad, lo que permite aplicarla en una amplia gama de cauces naturales (Chow V. T., 1959).

2.4.2. Modelos analíticos

Los modelos analíticos se caracterizan por incorporar fórmulas más detalladas y complejas que permiten la consideración de una mayor cantidad de variables en la estimación de la rugosidad. Un claro ejemplo es el método de Cowan, el cual ajusta el coeficiente de rugosidad de Manning tomando en cuenta las características del lecho, la presencia de obstrucciones y la variabilidad geométrica del cauce. Este enfoque proporciona una mayor

flexibilidad en la estimación de "n", ya que incluye factores adicionales que afectan la resistencia hidráulica y que no son considerados en modelos más simples (Cowan, 1956).

2.4.3. Modelos numéricos

Con los avances en la tecnología computacional, los modelos numéricos han adquirido una relevancia cada vez mayor en la simulación de flujos en cauces naturales. Estos modelos se fundamentan en la resolución de ecuaciones diferenciales parciales, como las ecuaciones de Saint-Venant, para simular de manera precisa el comportamiento del flujo bajo diversas condiciones hidrodinámicas. Aunque estos modelos requieren una mayor capacidad de cálculo, ofrecen una precisión superior y permiten analizar un mayor rango de escenarios complejos.

Entre los programas más utilizados se encuentran, el software HEC-RAS, desarrollado en 1995 por el Hydrologic Engineering Center del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, centrado en la modelación hidráulica de flujo en canales y ríos (U.S. Army Corps of Engineers, 1995), e IBER, lanzado como una colaboración entre el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) y el Grupo de Ingeniería fluvial de la Universidad Politécnica de Cataluña en el 2010, este último es particularmente popular en la modelación bidimensional de flujos y en la evaluación de la rugosidad durante la simulación del transporte de sedimentos y la velocidad del flujo (Bladé E., 2012).

2.5.Revisión de las diferentes metodologías existentes

2.5.1. Ecuación de Manning

El coeficiente de rugosidad de Manning “n” determina el grado de resistencia de las paredes y el fondo de un canal con flujo abierto, dentro de los cuales se encuentran los ríos. Con base en este concepto, el flujo presenta mayor dificultad en su desplazamiento conforme el canal sea más rugoso. La ecuación que determina esta variable fue presentada por quien fue nombrada, Robert Manning en 1889 y está definida por:

$$V = CR^{2/3}S^{1/2} \quad (2.1)$$

De esta expresión, que se encuentra en unidades inglesas:

V = velocidad media

R = radio hidráulico

S = pendiente

C = factor de resistencia al flujo

Al transformar la ecuación previa al sistema métrico:

$$V = \frac{1}{n}R^{2/3}S^{1/2} \quad (2.2)$$

Donde:

V = Velocidad media

R = Radio hidráulico

S = Pendiente

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

Dentro de la ecuación de Manning la variable con el mayor grado de dificultad para determinarse es el coeficiente de rugosidad, debido a que no existe un proceso específico para definirlo. Este parámetro suele ser un valor estimado, lo que resulta más verídico en ingenieros veteranos y mayormente una adivinanza en principiantes, pero finalmente resulta en una notoria variabilidad en su valor (Chow V. T., 1994).

2.5.2. Ecuación de Chézy

Por otro lado, en 1769, Antoine Chézy formuló la primera ecuación utilizada para el estudio del flujo uniforme. Esta ecuación se deduce bajo el supuesto de que la resistencia ofrecida al flujo por unidad de lecho es proporcional al cuadrado de la velocidad, y que la superficie en contacto con el fluido es equivalente al perímetro mojado total de la sección del canal (Paredes, Lavacude, & Rodriguez , 2021). A partir de estos principios, se obtiene la siguiente expresión.

$$V = C\sqrt{RS} \quad (2.3)$$

Donde:

V = Velocidad media

C = Factor de resistencia del flujo

R = Radio hidráulico

S = Pendiente

2.5.3. Método de Cowan

Este método se encarga de estimar el valor de “n” en función de algunos parámetros característicos del cauce, aplicando la siguiente fórmula:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad (2.4)$$

En donde n_0 es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso, n_1 es un valor que debe agregarse al n_0 para corregir el efecto de la rugosidad superficial, n_2 es un valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal, n_3 es un valor que toma en cuenta las obstrucciones, n_4 es un valor para considera la vegetación y las condiciones de flujo, y m_5 es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal. Los valores de n_0 a n_4 y m_5 pueden seleccionarse de la figura que está sujeta a condiciones dadas (Martinez & Solano, 2020).

Tabla 1.

Valores para seleccionar mediante el método de Cowan. Fuente: (Martínez & Solano, 2020)

Condiciones del canal		Valores
Material involucrado		
Tierra	n_0	0.020
Corte en roca		0.025
Grava fina		0.024
Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad		
Sueve	n_1	0.000
Menor		0.005
Moderado		0.010
Severo		0.020
Variaciones de sección transversal		
Gradual	n_2	0.000
Ocasionalmente alternante		0.005
Frecuentemente alternante		0.010 – 0.015
Efecto relativo de las obstrucciones		
Insignificante	n_3	0.000
Menor		0.010 – 0.015
Apreciable		0.020 – 0.030
Severo		0.040 – 0.060

Vegetación		
Baja		0.005 – 0.010
Media	n_4	0.010 – 0.025
Alta		0.025 – 0.050
Muy alta		0.050 – 0.100
Grado de los efectos por meandros		
Menor		1.000
Apreciable	m_5	1.150
Severo		1.300

2.5.4. Método de Meyer-Peter y Müller

La fórmula original de Meyer-Peter y Müller de 1948 es una de las expresiones más reconocidas en la ingeniería hidráulica para describir el transporte de sedimentos en lechos fluviales con materiales predominantemente gruesos. Este modelo fue diseñado para calcular la carga de sedimentos transportada en función del esfuerzo cortante y las propiedades granulométricas del lecho. La ecuación general se presenta de la siguiente manera:

$$q_s^* = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (2.5)$$

Donde:

q_s^* : Representa el transporte adimensional de sedimentos por unidad de ancho

τ^* : Es el esfuerzo cortante adimensional

τ_c^* : Es el esfuerzo cortante crítico adimensional para el inicio del movimiento de las partículas

Este modelo tiene como objetivo describir el transporte de partículas bajo diferentes condiciones hidráulicas y es aplicable principalmente a lechos no cohesivos (Meyer-Peter & Müller, 1948).

El esfuerzo cortante adimensional τ^* se define como:

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (2.6)$$

Donde:

τ : Es el esfuerzo cortante del flujo

$\rho_s - \rho$: Representan las densidades del sedimento y del agua, respectivamente

g : Es la gravedad

d : Es el diámetro medio de las partículas

El enfoque original de Meyer-Peter y Müller se basa en un análisis detallado de los mecanismos de transporte, lo que requiere un conocimiento preciso de los parámetros hidráulicos y granulométricos. Sin embargo, en estudios más prácticos, donde el interés radica en estimar la rugosidad hidráulica de un lecho granular, es común emplear versiones simplificadas que relacionan directamente la rugosidad con las características granulométricas del lecho, como el diámetro d_{90} . Este parámetro se define como el tamaño de partícula para el cual el 90% del material es más fino en peso (Cardona, 2019).

Una de estas versiones simplificadas toma la forma:

$$n = C * d_{90}^{1/6} \quad (2.7)$$

Aquí, n es un coeficiente de rugosidad relacionado con la resistencia al flujo sobre el lecho granular, d_{90} es el diámetro característico del material del lecho en metros, y C es un coeficiente empírico que depende de las unidades y condiciones específicas del flujo

(Cardona, 2019). Esta expresión se deriva al suponer que el tamaño de las partículas en el lecho domina las propiedades hidráulicas y que otros factores, como la pendiente o el caudal, pueden ser considerados secundarios en ciertos contextos.

Finalmente, la fórmula utilizada para el estudio está dada como:

$$n = 0.038 * d_{90}^{1/6} \quad (2.8)$$

La cual representa una especificación empírica derivada de la relación anterior, donde $C = 0.038$. Este coeficiente ha sido ajustado con base en estudios experimentales para flujos sobre materiales predominantemente gruesos y no cohesivos (Meyer-Peter & Müller, 1948); (Cardona, 2019). Al simplificar la fórmula original, se busca facilitar el cálculo del coeficiente de rugosidad en estudios hidráulicos, eliminando la necesidad de medir parámetros más complejos, como el esfuerzo cortante o el transporte de sedimentos.

2.5.5. Ecuación de Darcy-Weisbach

Permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro una tubería llena. Esta fórmula permite la evaluación apropiada del efecto de cada uno de los factores que inciden en la pérdida de energía en una tubería. Es una de las pocas expresiones que agrupan estos factores.

La ventaja de esta fórmula es que puede aplicarse a todos los tipos de flujo hidráulico (laminar, transicional y turbulento), debiendo el coeficiente de fricción tomar los valores adecuados, según corresponda. La forma general de la ecuación de Darcy-Weisbach es:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (2.9)$$

Donde:

h_f = pérdida de carga debida a la fricción.

f = factor de fricción de Darcy.

L = longitud de la tubería.

D = diámetro de la tubería.

V = velocidad media del fluido.

g = aceleración de la gravedad

2.5.6. Método de Colebrook-White

Es esencial en la determinación del factor de fricción en flujo turbulento dentro de conductos y canales. La ecuación de Colebrook-White es expresada como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

f = representa el factor de fricción.

ε = es la rugosidad absoluta de la superficie.

D = es el diámetro del conducto.

Re = es el número de Reynolds.

Esta ecuación es implícita y, debido a su complejidad, se resuelve generalmente mediante métodos iterativos, como el método de Newton-Raphson. Este método se emplea para estimar pérdidas de energía en función de la rugosidad del material y las características del flujo. Además, el avance en herramientas computacionales ha permitido obtener aproximaciones explícitas que reducen el tiempo de cálculo y facilitan el diseño de infraestructuras hidráulicas sin pérdida de precisión (Alfaro-Guerra, 2019).

2.5.7. Ecuaciones de Saint-Venant

Las ecuaciones representan la dinámica del flujo teniendo en cuenta la preservación de la masa tanto como la cantidad de movimiento en las direcciones transversal y longitudinal, lo que las convierte en perfectas para analizar fenómenos complejos en cauces poco profundos con geometrías irregulares.

Esto posibilita enfrentar circunstancias más realistas, tales como inundaciones en suelos planos, interacciones entre estructuras de agua y corrientes, o la difusión de ondas en grandes masas de agua. Mediante estas ecuaciones, se puede examinar la rugosidad del cauce y elementos como la inclinación del lecho y las fuerzas externas que afectan la dinámica del agua.

Las ecuaciones del modelo bidimensional de Saint-Venant se fundamentan en un sistema hiperbólico que consideran tres incógnitas, y en su versión conservada se manifiestan de la siguiente manera:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (2.13)$$

La ecuación inicial (2.11) ilustra la preservación de la masa, señalando que, si los flujos de agua cambian de un sitio a otro, el calado en un lugar concreto sufrirá cambios a lo largo del tiempo. En cambio, las dos ecuaciones siguientes (2.12 y 2.13) ilustran la conservación del movimiento en las direcciones X y Y, respectivamente, detallando cómo los flujos se alteran en función de las fuerzas existentes, que incluyen las fuerzas de inercia, gravedad, presión y fricción con los bordes. (Salmon, 2024).

Donde:

h: Profundidad del agua

q: Caudal unitario

g: Gravedad

S₀ Pendiente del canal

S_f: Pendiente de fricción

2.6. Aplicaciones específicas en confluencias de Ríos

Las confluencias de ríos representan espacios de interacción compleja donde confluyen flujos con características diferentes, lo que genera fenómenos como turbulencias, redistribución de velocidades y cambios en el transporte de sedimentos. Estas áreas no solo influyen en el comportamiento hidráulico, sino que también impactan en la estabilidad de infraestructuras, ecosistemas y comunidades cercanas (Priego, Leon , & Rivera, 2017). Los

modelos hidráulicos disponibles, revisados en la sección anterior, proporcionan herramientas clave para entender y gestionar estos entornos de manera efectiva.

2.6.1. Estimación de la rugosidad y análisis preliminar

La ecuación de Manning ayudará en el análisis de la resistencia al flujo en la confluencia entre Río Tarqui y el Río Yanuncay, ya que relaciona el coeficiente de rugosidad con las características geomorfológicas del lecho y la variación de velocidad con respecto a la pendiente. En estas áreas, este modelo permite estimar cómo la heterogeneidad del lecho, causada por la mezcla de materiales gruesos y finos, afecta la velocidad del agua (Chow V. T., 1994).

2.6.2. Precisión en la dinámica del flujo

IBER 2D, permitirá simular los patrones de flujo en la confluencia de manera detallada, capturando fenómenos complejos como la recirculación y los gradientes de velocidad en zonas de mezcla. Estos modelos son particularmente valiosos para identificar áreas propensas a acumulaciones de sedimentos o erosión excesiva (Bladè, Cea, Coreinstein, Escolano, & Puertas, 2012).

2.6.3. Modelación de ondas dinámicas en la confluencia

Las ecuaciones de Saint-Venant, utilizadas en modelaciones unidimensionales y bidimensionales, permiten evaluar cómo las ondas de flujo generadas en una confluencia impactan en la estabilidad del cauce aguas abajo. Este enfoque es ideal para predecir el

comportamiento de eventos extremos, como lluvias intensas, y para optimizar estrategias de control de inundaciones en zonas urbanas cercanas a confluencias (Salmon, 2024).

2.6.4. Ajuste en entornos naturales complejos

El método de Cowan permitirá ajustar el coeficiente de rugosidad de manera detallada, considerando las particularidades de cada tramo, ya que descompone la rugosidad total en varios componentes que reflejan las características físicas del cauce, permitiendo una estimación más precisa del comportamiento hidráulico, especialmente en entornos complejos como el de la confluencia (Martínez & Solano, 2020).

2.7. Análisis dimensional aplicado a los regímenes de flujo

2.7.1. Flujo subcrítico

En este sistema, las fuerzas viscosas superan a las fuerzas gravitacionales, distinguiéndose por sus velocidades y pendientes reducidas. No obstante, el tirante hidráulico es considerablemente superior con relación a los que se manifiestan en flujo supercrítico. En este estado, el número de Froude es inferior a 1 (Mendoza, 2024).

2.7.2. Flujo crítico

Este flujo se distingue por poseer una mezcla de fuerzas inerciales y gravitatorias que lo convierten en inestable, situándolo en un punto intermedio entre el flujo subcrítico y supercrítico, siendo así variable. Por estas razones, es necesario prevenirlo de forma decidida en la creación de estructuras de agua. Se distingue por poseer un número de Froude muy próximo a 1 (Mendoza, 2024).

2.7.3. Flujo supercrítico

En este tipo de corrientes, las fuerzas inerciales poseen una importancia superior a las fuerzas gravitatorias, donde usualmente se observan velocidades e inclinaciones elevadas, lo que resulta en profundidades reducidas. En esta situación, la cantidad de Froude supera 1. Este estado representa el inicio de la creación de resaltos hidráulicos, los cuales poseen una elevada capacidad para disipar energía (Mendoza, 2024).

CAPITULO 3. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS

3.1. Diseño de la investigación experimental

3.1.1. Selección y justificación del área de estudio: Confluencia Tarqui-Yanuncay

La confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay representa un fenómeno natural de gran relevancia, localizado en una de las áreas más estratégicas de la ciudad de Cuenca. Este entorno ejerce un impacto significativo en la hidrodinámica fluvial de la región. La rugosidad de fondo, entendida como la resistencia que el lecho del río ofrece al flujo, es un parámetro crucial cuya caracterización es indispensable para comprender su influencia en la velocidad y el comportamiento del flujo del agua.

La importancia de evaluar la rugosidad en esta área radica en su impacto directo en la calidad del agua. Los sedimentos presentes en el lecho pueden actuar como vectores de contaminantes, generando consecuencias ambientales que afectan tanto a la ciudad como a sus habitantes. Dada la condición de la confluencia como zona de alto impacto, es fundamental obtener resultados que sirvan como insumos clave en la toma de decisiones relacionadas con el diseño de infraestructuras y la planificación de proyectos para una gestión óptima de los recursos hídricos. (Cedillo, Timbe, Samaniego, & Alvarado, 2021)

Además, este análisis es esencial para la mitigación de riesgos de inundaciones, eventos que ocurren con frecuencia en la región ante un incremento de caudales. La comprensión profunda de la dinámica de flujo y el comportamiento del cauce por medio de un modelo numérico permitirá implementar estrategias efectivas para mejorar la resiliencia de la ciudad frente a estos fenómenos.

3.1.2. Ubicación del área de estudio

La ciudad de Cuenca, ubicada al sur del país se encuentra atravesada por cuatro ríos, Yanuncay, Tarqui, Tomebamba y Machángara. El punto de interés es la confluencia de los dos primeros, ubicados en una de las zonas urbanas con alto tránsito de la ciudad, su ubicación geográfica está en las coordenadas 2° 55' 1,5'' Sur y 79° 0' 4,2'' Oeste junto al Jardín Botánico de la ciudad.

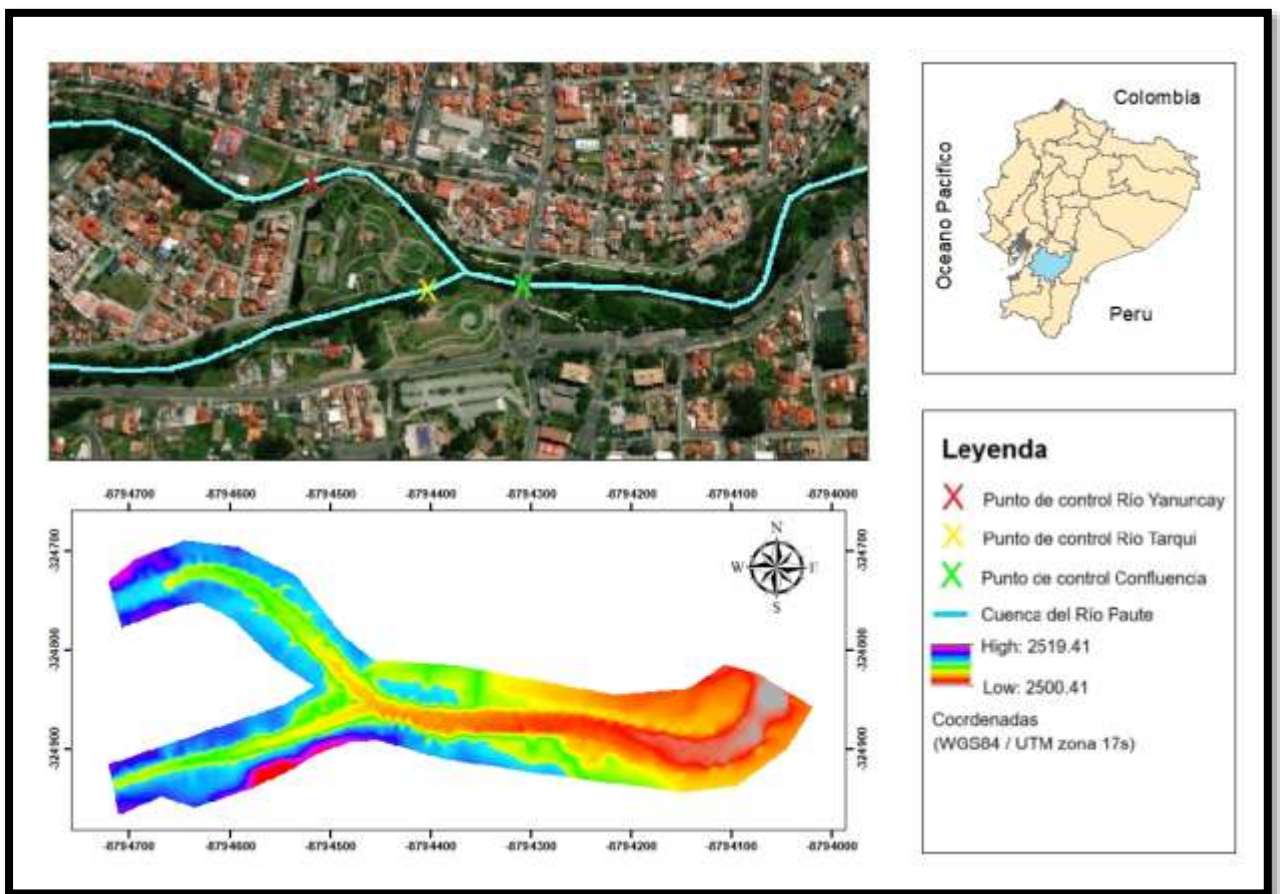


Ilustración 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. (Fuente; Propia)

3.1.3. Enfoque y estrategia de muestreo

Para la caracterización de la rugosidad en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, se emplea un enfoque de muestreo sistemático, alineado con los objetivos

hidrodinámicos del estudio. Este enfoque considera tanto las condiciones geomorfológicas como las hidrodinámicas de la zona, con el propósito de obtener una muestra precisa y aplicable a los modelos numéricos.

El enfoque se fundamenta en la selección de puntos de muestreo distribuidos estratégicamente en la confluencia. Estos puntos se seleccionan considerando la heterogeneidad del lecho del río, las variaciones en granulometría, y las características del flujo en áreas clave de la confluencia. Esta estrategia permite capturar la variabilidad espacial de la rugosidad, lo que es esencial para ajustar los parámetros del modelo en el software IBER 2D y asegurar su precisión en la simulación de flujos bidimensionales.

Determinación de secciones representativas: Se identifican varias secciones transversales en la confluencia, basadas en estudios previos y observaciones en campo. Cada sección se muestrea en intervalos regulares y representativos para capturar tanto áreas de alta como baja rugosidad.

Frecuencia y temporalidad del muestreo: Dado que la rugosidad puede variar con las condiciones hidrológicas y estacionales, se realizan muestreos en las épocas de invierno y verano. Esto es clave para capturar variaciones debidas a fenómenos como la sedimentación y la socavación, que pueden influir en el coeficiente de rugosidad y afectar la precisión de las simulaciones

Registro de datos hidrodinámicos complementarios: Además del muestreo físico, se recogen datos de flujo como velocidad y caudal en cada punto de control. Estos datos sirven para validar las simulaciones en IBER, mediante la comparación de las condiciones medidas en campo con las generadas por el modelo.

3.2. Caracterización del lecho y fondo del Río

3.2.1. Métodos de muestreo y análisis granulométrico

La caracterización de un lecho fluvial depende de forma directa de las condiciones que presenta, siendo la rugosidad uno de los parámetros clave en alterar su hidrodinámica.

La determinación de la rugosidad se basa en el análisis granulométrico del material que conforma el lecho y fondo de un río. Con el paso de los años los métodos empleados para su cálculo han evolucionado significativamente, desde la medición in situ y tamizado en laboratorio, hasta técnicas más avanzadas como el análisis por medio de imágenes.

Al hablar de mediciones in situ, el método se basa en el empleo de flexómetros para medir manualmente el diámetro de los materiales del lecho y clasificarlos dependiendo de su tamaño. Por otro lado, el tamizado en laboratorio implica la recolección muestras en el área de estudio y su traslado a un laboratorio especializado para su clasificación con el empleo de tamizadoras.

En estos dos métodos, aunque eficientes, su aplicación puede resultar compleja debido a la dificultad de acceso al material del lecho, factor que depende de las condiciones que presenta el entorno y dificulta el proceso de análisis y determinación de la rugosidad.

Mediciones in situ

La medición in situ está basada en el seccionamiento del río en tramos, y en el uso de herramientas como flexómetros y reglas para determinar el diámetro de las partículas, considerando sus medidas en ejes a, b y c, definidos como el mayor, el intermedio y menor, respectivamente.

En caso de que la partícula tenga una forma elipsoidal la determinación de estos ejes es directa; sin embargo, si tiene una forma romboidal el proceso requiere de un análisis más cuidadoso para diferenciar de manera correcta los ejes a y b, evitando confusiones que alteren los resultados. (Millanao, 2010)

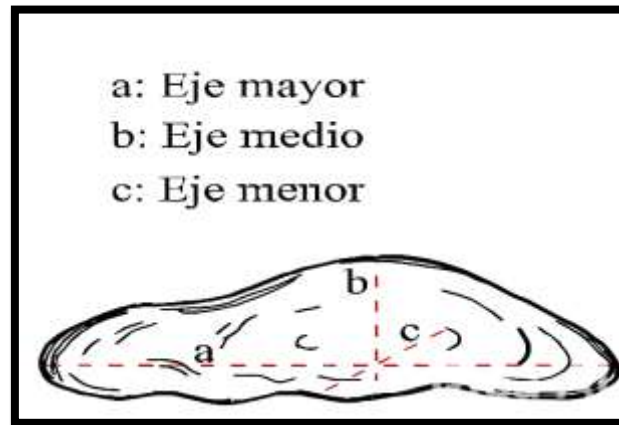


Ilustración 2. Ejes principales de la partícula de áridos. Fuente: (Millanao, 2010)

Otro de los parámetros que considera el método es el diámetro nominal, conocido como D_n , el cual en análisis de masa o volumen resulta más importante que la medida tomada del eje b. Este diámetro considera la medida de los tres ejes previos, e intuye el valor de diámetro que se asumiría en caso de ser una esfera. (Millanao, 2010)

$$D_n = (a * b * c)^{\frac{1}{3}} \quad (3.1)$$

Para el cálculo del tamaño de las partículas, se considera que la frecuencia de las partículas de los ríos se encuentra distribuida de manera logarítmica. Para lograr una proximidad de distribución normal de clases, se aumenta en factor de 2 el tamaño de las partículas, conocida como la escala Wentworth (1922), un sistema de clasificación granulométrica que describe el tamaño de los sedimentos con respecto a su diámetro. Esta escala es utilizada por geólogos e hidrólogos. En esta clasificación el tamaño de las partículas esta expresado en mm. (Millanao, 2010)

Tabla 2.

Clasificación del tamaño de partículas. Escala de Wentworth. Fuente: (Bunte & Abt, 2001)

Descripción del tamaño de partícula	$\phi = -\log_2$	mm	$\psi = -\log_2$
Bolones			
Muy grandes	-12.0	4096	12.0
	-11.5	2896	11.5
	-11.0	2048	11.0
Grandes	-10.5	1448	10.5
	-10.0	1024	10.0
Medios	-9.5	724	9.5
	-9.0	512	9.0
Pequeños	-8.5	362	8.5
	-8.0	256	8.0
Cantos			
Grandes	-7.5	181	7.5
	-7.0	128	7.0
Pequeños	-6.5	90.5	6.5
	-6.0	64	6.0
Grava			
Muy gruesa	-5.5	45.3	5.5
	-5.0	32.0	5.0
Gruesa	-4.5	22.6	4.5
	-4.0	16.0	4.0
Media	-3.5	11.3	3.5
	-3.0	8.0	3.0
Fina	-2.5	5.66	2.5
	-2.0	4.0	2.0
Muy fina	-1.5	2.83	1.5
	-1.0	2	1.0
Arena			
Muy gruesa	-0.5	1.41	0.5
	0	1.0	0
Gruesa	+0.5	0.707	-0.5
	+1.0	0.500	-1.0
Media	+1.5	0.354	-1.5
	+2.0	0.250	-2.0
Fina	+2.5	0.177	-1.5
	+3.0	0.125	-3.0
Muy fina	+3.5	0.088	-3.5
	+4.0	0.063	-4.0
Limo	+8.0	0.0039	-8.0
Arcilla	+12.0	0.00024	-12.0

Granulometría en laboratorio

Un segundo método para el análisis de la granulometría del lecho es el tamizado, el cual consiste en la recolección de una muestra representativa del material en el área de estudio y transportarlo a un laboratorio autorizado.

Una vez en laboratorio, su análisis se realiza mediante el empleo de una tamizadora, un equipo diseñado específicamente para clasificación de sedimentos con respecto al diámetro de la partícula. Este proceso se lleva a cabo por medio del empleo de tamices de abertura progresivamente más pequeña, comúnmente ubicados de manera vertical. Cada tamiz permite separar el material según su diámetro, siendo las partículas más pequeñas las que pasan de los superiores, y más grandes, tamices, mientras que aquel material más grande permanece en la parte superior del equipo.

Para clasificar el material de forma adecuada la maquinaria aplica movimiento vibratorio y empleo de fuerza continuo. Las normas ISO 3310 – 1:2000 y ASTM E11 son aquellas que establecen los requisitos que deben cumplir los tamices y el equipo como tal, previos a llevar a cabo el ensayo. El resultado del tamizado es una curva granulométrica, que proporciona una representación gráfica de la distribución del tamaño de las partículas en la muestra. (ASTM International, 2015)

Granulometría por imágenes

Una caracterización de la morfología realizada mediante esta metodología utiliza imágenes obtenidas de cámaras digitales y procesadas por medio de softwares fundamentan su medición con referencia a los pixeles de la imagen. El uso de este método más actual, facilita la medición de partículas y reduce la incertidumbre en su proceso de cálculo. Es

necesaria la capacitación en el manejo de softwares debido a la necesidad de calibración del sistema. (Garcia, y otros, 2015)

3.3.Determinación y evaluación de coeficientes de rugosidad

Estudios previos realizados dentro de la unidad académica en el área, han determinado los valores aproximados de las rugosidades presentes al emplear los métodos de, medición in situ y granulometría por tamizado. Debido a la dificultad de análisis del material en el lecho las rugosidades calculadas se establecen en rangos con valores dispersos, pues dependiendo del método utilizado, se presentan falencias en ámbitos específicos.

La medición in situ tiene mayor relevancia en aquellas partículas de mayor tamaño, contrario al método de tamizado en el cual, el material más grande es obviado del análisis si su tamaño no es apto para la maquinaria.

Las mediciones in situ desarrolladas por estudiantes de la unidad académica en el proyecto de investigación formativa **“Caracterización experimental de la confluencia del río Yanuncay con el río Tarqui”** con código **PIFCV22-04**, en el lecho del río Tarqui reportaron valores de rugosidad hidráulica en un rango comprendido entre 0.0349 y 0.0471 con un promedio de 0.0412; Por otro lado, en un empleo del método de tamizado los valores se establecieron en un intervalo entre 0.0213 y 0.0338 con un promedio de 0.02755.

En el caso del río Yanuncay, las mediciones in situ arrojaron valores de rugosidad que oscilaron entre 0.02925 y 0.03709 con una rugosidad promedio de 0.03317; el empleo del método de granulometría refleja valores más dispersos entre si con un mínimo de 0.02828 y un máximo de 0.03917 con un promedio de 0.03372.

El análisis de puntos en la confluencia de estos ríos por el método de medición in situ sitúa los valores de rugosidad englobados en un intervalo de entre 0.02643 y 0.03906, con una rugosidad promedio de 0.0327; por otro lado, los resultados obtenidos empleando el método granulométrico establecen valores entre 0.043 y 0.035 con una rugosidad promedio de 0.039.

3.3.1. Rugosidad en el Río Tarqui

El cálculo de la rugosidad del lecho del río Tarqui se realiza mediante método de granulometría por imágenes con el empleo del software de análisis BaseGrain. Con el fin de garantizar la calidad de las fotografías y su precisión, estas son capturadas por medio de un dron ubicado perpendicular al lecho fluvial, asegurando una óptima cobertura y distinción entre materiales del área de estudio.

Se señala el área de análisis como parte del proceso y se dispone de material de referencia (en el caso conos) para reconocer una medida conocida de 1 metro, dicha distancia determina el número de píxeles existentes en la imagen digital por cada metro en la vida real, necesarios para la calibración y ajuste del programa previo y durante el procesamiento.



Ilustración 3. Imagen por dron, granulometría Río Tarqui. (Fuente; Propia)

La imagen se descompone en dos secciones ampliadas para optimizar la interpretación de las partículas más pequeñas. Se calibra el software en función de la resolución y calidad de la imagen original para un análisis más preciso. Se requiere calibración manual en la identificación de los elementos a considerar como partículas del lecho y aquellos no representativos, como secciones del cauce, la vegetación y obstrucciones presentes en el área.

Con base en la ampliación de la imagen y la calidad de la imagen previa se establece una escala de análisis de 1.8598 mm / px para las 2 secciones en estudio.



Ilustración 4. Zona de análisis Tarqui (Sección 1). (Fuente; Propia)

El análisis de imagen se basa en la calibración manual de las partículas del lecho que se toman en consideración para el cálculo de rugosidad. En el caso particular, se omiten ciertos materiales a los costados de la imagen de forma intensional considerándolos como agua, debido a que pueden influir en la medición de otros a su alrededor, al excluir una particular de tamaño mediano se facilita analizar una elevada cantidad de material.

Para la determinación del diámetro de las partículas, el programa mide los ejes de cada uno de los sedimentos calibrados para análisis, manteniendo la escala en los ejes de coordenada en los pixeles que relacionan las dimensiones en la imagen digital con las medidas reales, garantizando una medición precisa y representativa de la rugosidad.

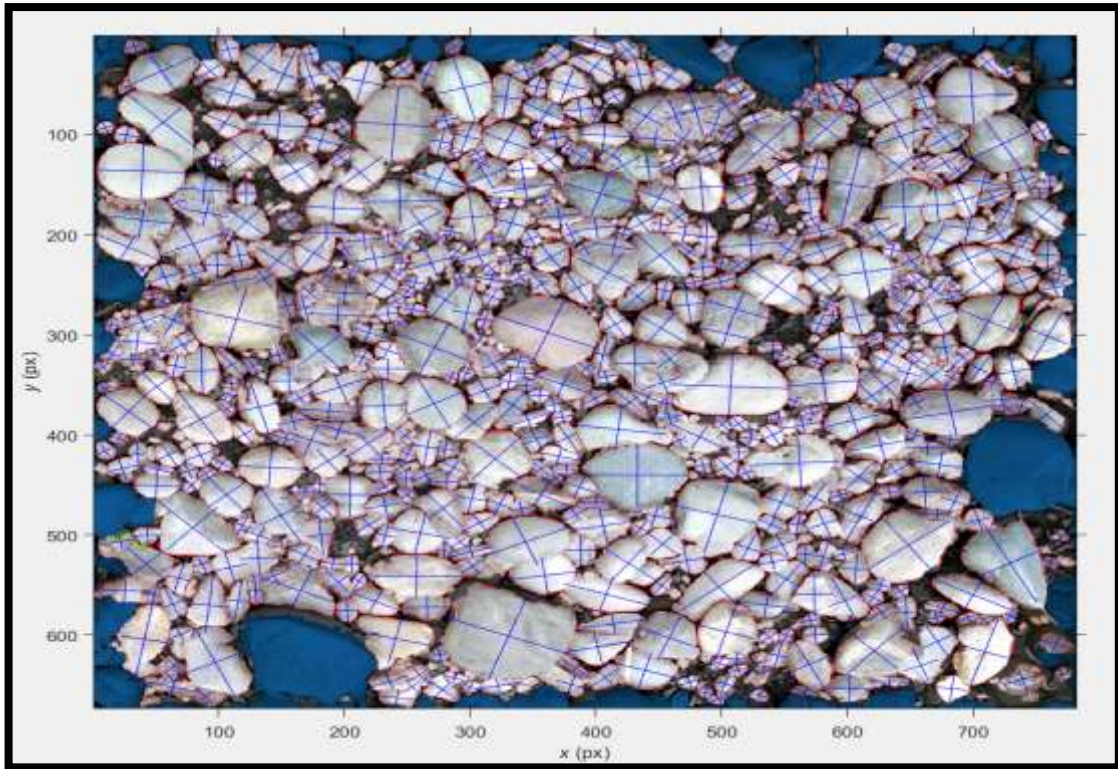


Ilustración 5. Análisis mediante el software Tarqui (Sección 1). (Fuente; Propia)

La sección 2 del río Tarqui mantiene igual calibración en la escala de la imagen y el proceso de análisis granulométrico se repite con la calibración manual necesaria para la identificación de los materiales.



Ilustración 6. Zona de análisis Tarqui (Sección 2). (Fuente; Propia)

De igual manera, en la sección 2 del análisis en el río Tarqui, durante su calibración manual, se eliminan intencionalmente materiales situados en los bordes al considerarlos como agua, con el objetivo de reducir el número de partículas afectadas en el análisis. En esta sección, la presencia de partículas con diámetro mínimo es menor a la Sección 1, evidenciando una mayor proporción de partículas de tamaño mediano a grande.

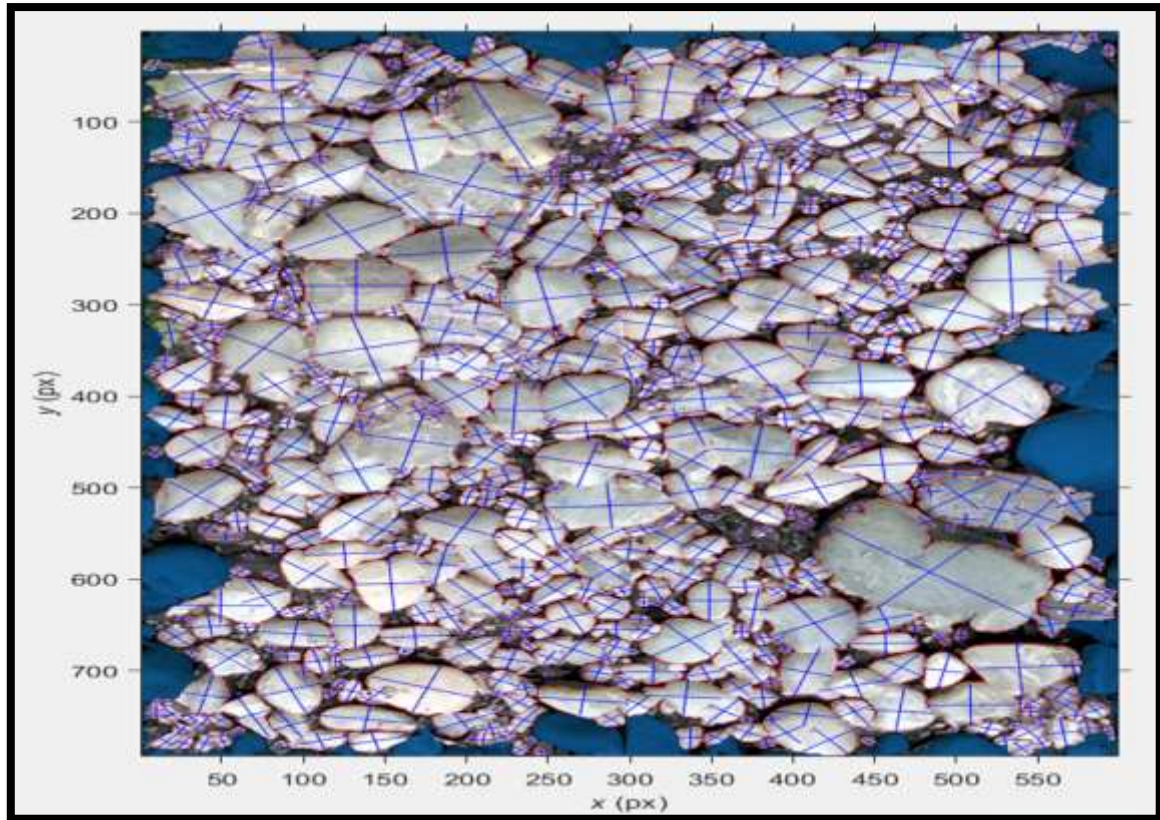


Ilustración 7. Análisis mediante el software Tarqui (Sección 2). (Fuente; Propia)

3.3.2. Rugosidad en el Río Yanuncay

La siguiente ilustración muestra la captura aérea realizada por dron en una posición perpendicular del lecho de Río Tarqui, de manera que se garantiza la distinción de los materiales presentes en la zona y su cobertura completa. Esta imagen es parte del proceso de cálculo de rugosidad por medio de fotometría, empleando nuevamente el software BaseGrain.

Parte de este proceso es la señalización del área de análisis utilizando conos como material de referencia, para establecer de esta forma, una escala de 1 metro en la realidad, para definir su cantidad de pixeles por metro en su presentación digital, dicha calibración necesaria para asegurar la precisión de medición de partículas.



Ilustración 8. Imagen por dron, granulometría Río Yanuncay. (Fuente; Propia)

Para calcular la rugosidad presente en el lecho del río Yanuncay se replica el procedimiento previo. Sin embargo, debido a la elevada concentración de partículas pequeñas, la calibración del programa requiere de una mayor ampliación de la imagen de estudio asegurando que la calidad de esta no se vea comprometida.

Para las dos secciones analizadas, se dispone una escala de análisis de 5.6586 mm / px, optimizando la precisión y la identificación de las partículas presentes.



Ilustración 9. Zona de análisis Yanuncay (Sección 1). (Fuente; Propia)

La próxima ilustración define la imagen ampliada de la primera sección del lecho en análisis y su material. Esta vista permite detallar, identificar y clasificar los distintos sedimentos presentes, desde las partículas más finas a aquellos cantos rodados de mayor tamaño. Las escalas en pixeles presentes en los ejes de coordenada permiten relacionar las medidas digitales con las reales.

La presencia una gran cantidad de partículas de tamaño reducido requiere la omisión de algunos cantos pequeños a los cuales se les considera como agua, priorizando la medición del mayor número de partículas con la calibración manual de la imagen. La medición de las partículas a partir de sus ejes junto a la correlación entre medidas digitales con las reales con los pixeles de la fotografía original, se garantiza la evaluación de tamaño y distribución de sedimentos.

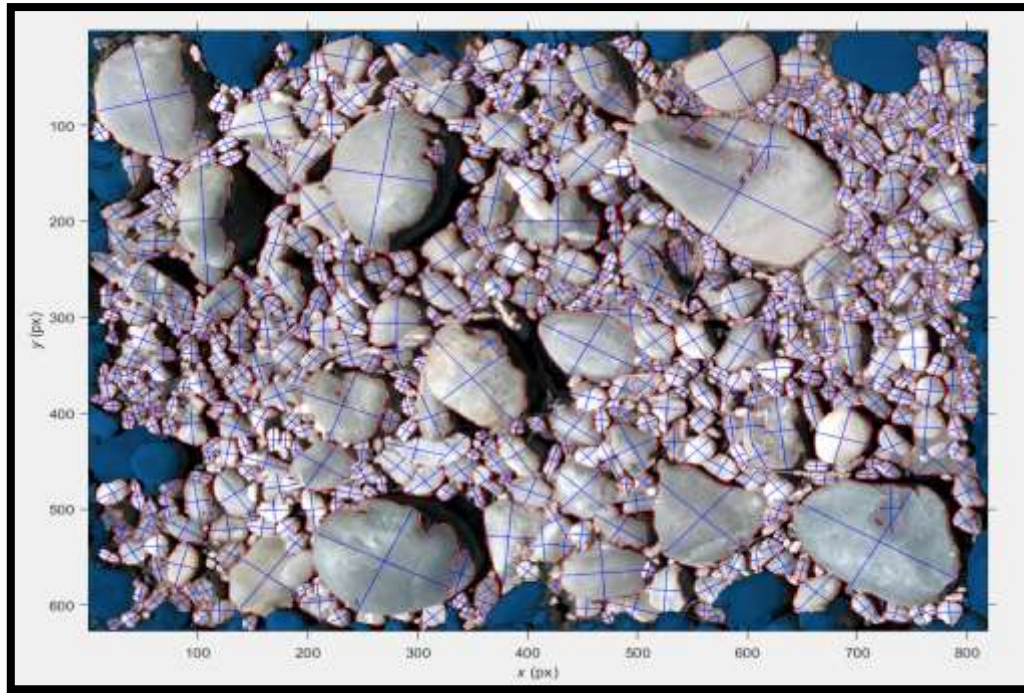


Ilustración 10. Análisis mediante el software Yanuncay (Sección 1). (Fuente; Propia)

La Sección 2 del río Yanuncay mantiene su calibración en la escala de la imagen y el proceso de análisis granulométrico se repite con la calibración manual en identificación de elementos necesarios y aquellos no representativos.



Ilustración 11. Zona de análisis Yanuncay (Sección 2). (Fuente; Propia)

En contraste con las Secciones del río Tarqui, en esta sección del río Yanuncay se observa la presencia de cantos y bolones de tamaños medianos y grandes, lo cual influye en la distribución de los sedimentos y la caracterización de la rugosidad.

Para el análisis del programa, se repite la calibración manual de las partículas previa la medición de sus ejes para el cálculo, asegurando la correspondencia entre los pixeles de la imagen digital establecidos en los ejes de coordenada, y sus dimensiones reales.

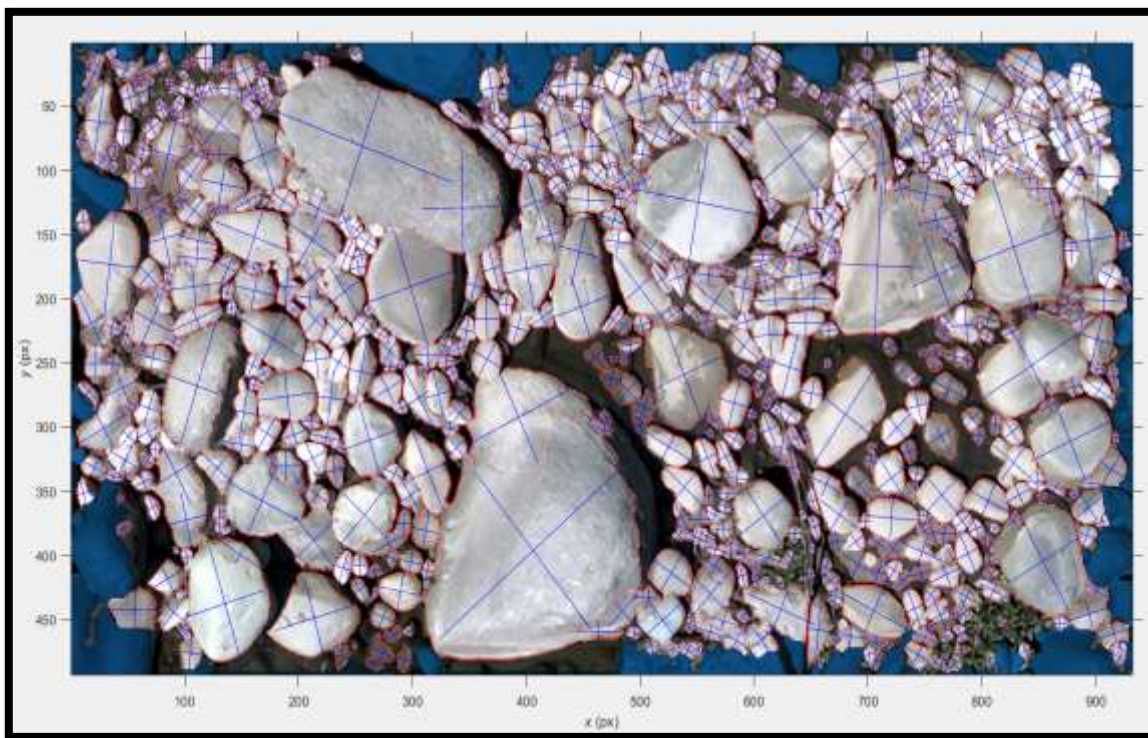


Ilustración 12. Análisis mediante el software Yanuncay (Sección 2). (Fuente; Propia)

3.3.3. Rugosidad en la Confluencia

La ilustración expuesta a continuación, muestra una perspectiva aérea capturada por dron donde se observa el material de lecho presente en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, cuya dinámica fluvial y condiciones geomorfológicas cambian por la unión de los

mencionados. La imagen se emplea en la caracterización de rugosidad por medio del software BaseGrain para su análisis por granulometría por imágenes.



Ilustración 13. Imagen por dron, granulometría Confluencia. (Fuente; Propia)

El punto central de estudio en la confluencia de los dos ríos mencionados tiene un proceso de cálculo de rugosidad semejante a los anteriores. En este caso, la escala de procesamiento, debido a la cantidad de partículas presentes en las imágenes es mayor a la empleada en el río Tarqui, pero menor a la usada en el río Yanuncay con un valor de 5.4949 mm/px de forma que la calidad de la imagen es la óptima para la identificación de materiales y la calibración manual requerida.



Ilustración 14. Zona de análisis Confluencia (Sección 1). (Fuente; Propia)

La Sección 1 de análisis en el punto de confluencia cuenta con la presencia de sedimentos de diversos tamaños, desde la presencia de grava y gravilla a bolones medianos y grandes, la ampliación de la imagen aérea causa que algunas partículas presentes en los límites de la imagen no estén completas, por lo cual, se los considera como agua, priorizando el análisis de la mayor cantidad de partículas.

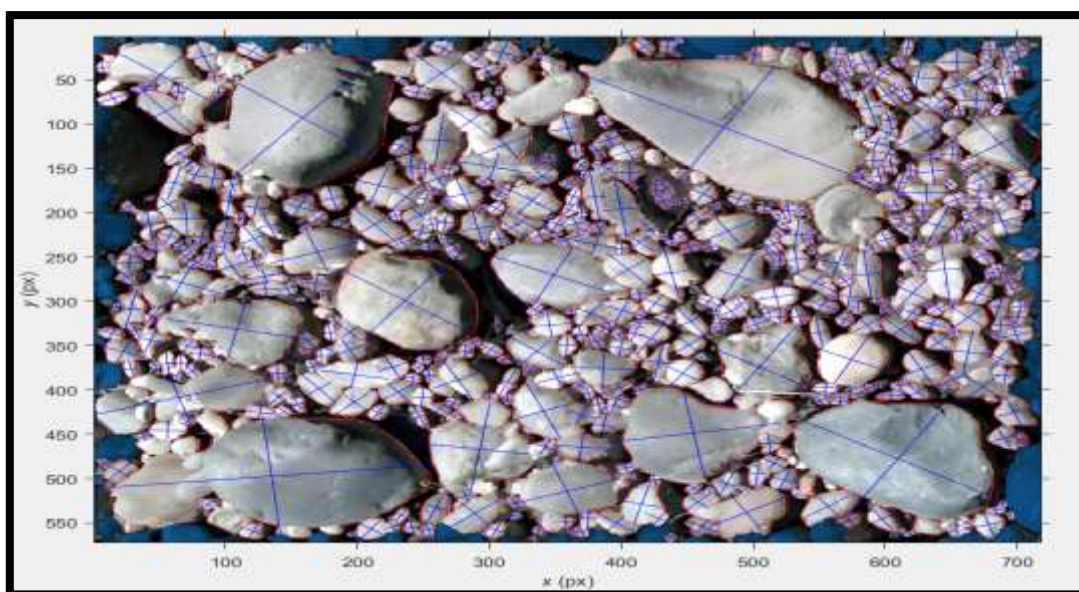


Ilustración 15. Análisis mediante el software Confluencia (Sección 1). (Fuente; Propia)

La Sección 2 de la Confluencia conserva su calibración en la escala de la imagen, el proceso de análisis granulométrico y calibración manual en identificación de elementos necesarios y aquellos no representativos se repite.



Ilustración 16. Zona de análisis Confluencia (Sección 2). (Fuente: Propia)

En el caso de la Sección 2, la ilustración próxima, muestra el análisis del material en el lecho, donde se evidencia una presencia más compleja en la distribución de partículas, con cantos rodados de diversos tamaños y coloración.

Las zonas con coloración más oscura sin presencia de material de tamaño visible pueden indicar la existencia de pozos de limos o arenas. Estas áreas pueden influir en la dinámica del flujo, afectando la rugosidad de fondo y, como consecuencia de esto, en su comportamiento hidráulico. Considerando estos factores al momento de calibración manual, se identifican los ejes principales de cada partícula para su medición al aplicar el software y posterior cálculo de rugosidad.

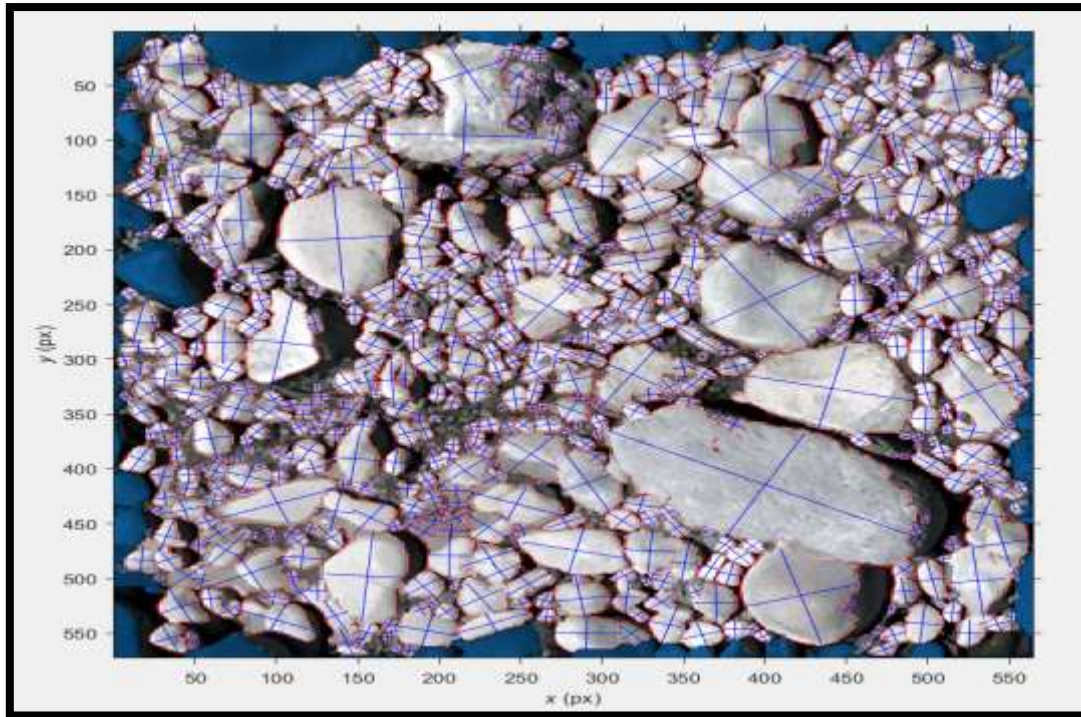


Ilustración 17. Análisis mediante el software Confluencia (Sección 2). (Fuente; Propia)

3.4. Validación y ajuste del modelo numérico

3.4.1. Selección y fundamentación del Software IBER

El software IBER fue elegido para este estudio porque ofrece una solución integral y precisa para analizar las dinámicas fluviales en escenarios complejos, como la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay. Este tipo de escenarios, donde los flujos interactúan de manera bidimensional, requieren una herramienta que pueda capturar fenómenos como recirculaciones, gradientes de velocidad y transporte de sedimentos. Además, el análisis detallado de la rugosidad de fondo del lecho juega un papel central en esta investigación, e IBER proporciona las herramientas necesarias para integrar esta variable de forma precisa.

Fundamentos para la selección de IBER 2D

La elección de IBER se fundamenta en varias razones técnicas y prácticas que lo convierten en la mejor opción para este estudio:

Modelación bidimensional: A diferencia de modelos unidimensionales, IBER resuelve las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, permitiendo capturar la variabilidad espacial de las dinámicas fluviales (Bladè, Cea, Coreinstein, Escolano, & Puertas, 2012). Esto es especialmente importante en una confluencia, donde los flujos presentan interacciones complejas que no pueden ser simplificadas.

Precisión en el análisis de rugosidad: La rugosidad del lecho es un parámetro clave en este estudio. IBER permite definir rugosidades variables para diferentes áreas del cauce, ajustándolas a las condiciones locales (Carlos Rincon, 2017). Esto asegura que las simulaciones representen fielmente la interacción entre el flujo y el lecho.

Facilidad de integración con datos locales: En este caso, se utilizó un Modelo Digital del Terreno (MDT), que fue integrado de manera eficiente en IBER. La capacidad del software para trabajar con este tipo de datos asegura una representación precisa de la geometría del área de estudio.

Visualización intuitiva: IBER genera resultados en forma de mapas bidimensionales que muestran variables como velocidad, profundidad y transporte de sedimentos. Estos gráficos permiten identificar áreas críticas y comunicar resultados de manera efectiva (Escudero, 2022).

3.4.2. Calibración de parámetros para la confluencia

Modelación digital del terreno (MDT)

La eficacia de los resultados está directamente vinculada a la exactitud y resolución del MDT, razón por la cual es imprescindible efectuar la calibración y validación de esta, puesto que es el requisito principal para la modelación hidrodinámica bidimensional de la confluencia entre el río Tarqui y el río Yanuncay.

El MDT suministrado se realizó por medio del Software ArcGIS, el cual posee una resolución de 1 metro, lo que se puede determinar con precisión al dirigirse a la sección de propiedades de la capa. Esta resolución evidencia que cada píxel simboliza una zona de 1x1 metros en el terreno. Por ello, se lo reconoce como un MDT de alta resolución, de acuerdo con el análisis efectuado por Jhoselin Zapata (2022). Así pues, desempeña un papel crucial como base de datos de información geográfica, utilizada para el estudio del suelo y el modelado de agua. La resolución del MDT es crucial ya que impacta en los rasgos hidrológicos y geomorfológicos, por lo tanto, influye en las simulaciones a llevar a cabo (Escudero, 2022).

El MDT es una ilustración cuantitativa de la superficie del planeta y se encuentra georreferenciada con coordenadas UTM WGS-1984, Zona 17S, que ofrece datos fundamentales acerca del perfil del terreno. El modelo digital del suelo junto con sus características derivadas (área, pendiente, curvatura, aspecto, topografía, etc.) son factores clave para la obtención de datos o la valoración de cualquier procedimiento a través del estudio del terreno.

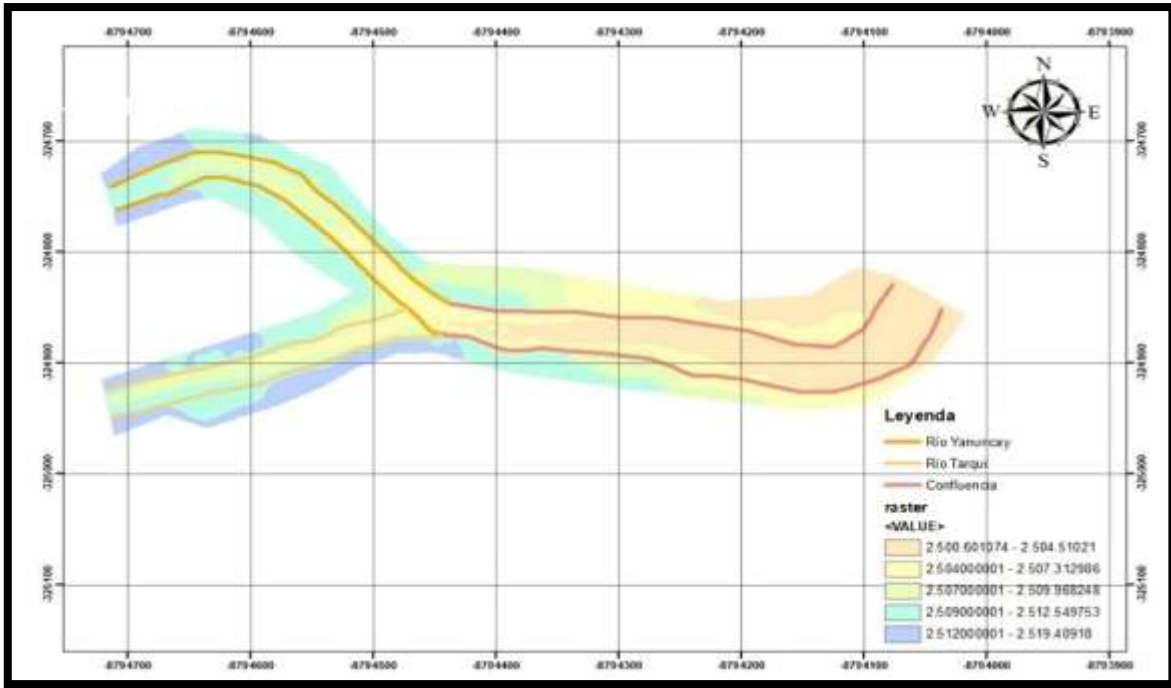


Ilustración 18. Modelo digital del sitio analizado. (Fuente; Propia)

Estimación de los coeficientes de rugosidad

Con la validación del modelo digital de terreno, el MDT adquirido se transforma en un documento Shapefile a manera de polígonos, adquiriendo el contorno del MDT. Con base en este, se procede a delimitar y asignar un uso de suelo a las áreas correspondientes tanto al Río Tarqui, el Río Yanuncay, la Confluencia y la Vegetación urbana alrededor presente como se observa en la Ilustración 19.

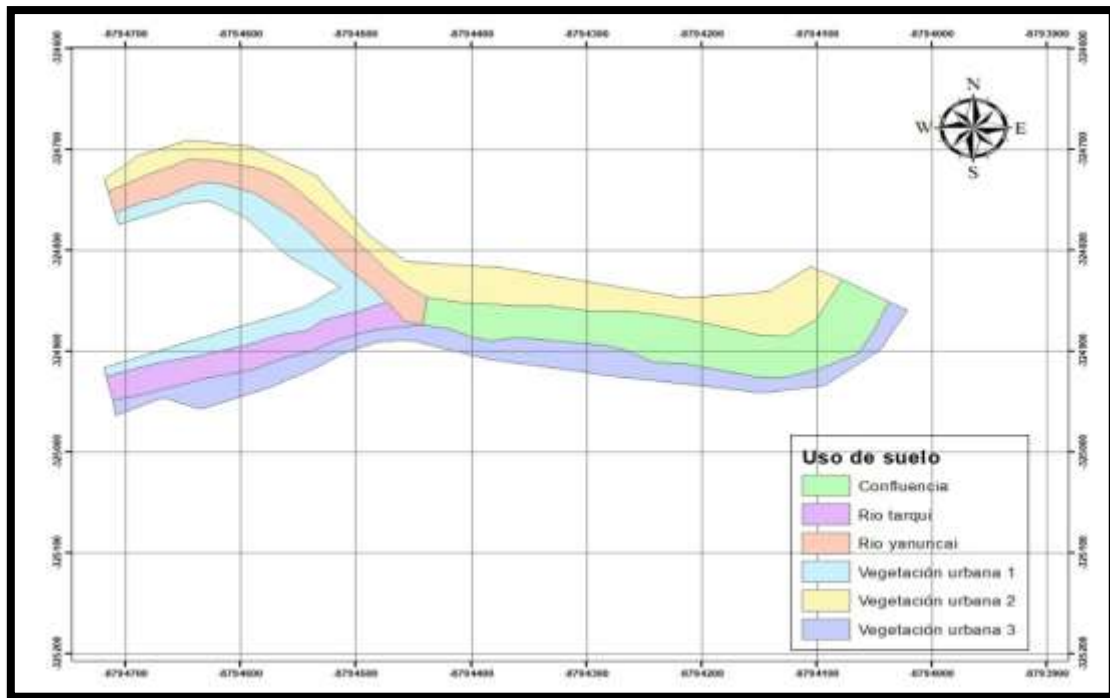


Ilustración 19. Delimitación de secciones en el cauce y áreas de inundación. (Fuente; Propia)

Una vez realizado este proceso con la ayuda de método de Cowan como se muestra en la Tabla 1, se asignan los diferentes tipos de rugosidades en función al grado de vegetación que posee cada zona, ya sea baja, media, alta o muy alta. Además, se asignan las rugosidades realizadas con anterioridad tanto para Ríos como Confluencia como se aprecia en la Tabla 9, para luego generar un archivo Ráster seguido de un archivo ASCII, el cual será fundamental al momento de aplicar dichas rugosidades a nuestro modelo bidimensional.

Asignación de caudales de modelación

Para garantizar la precisión de la modelación hidrodinámica, se realiza la calibración de caudales utilizando datos experimentales obtenidos en colaboración con los responsables de la tesis titulada "**Caracterización Experimental y Numérica de Velocidad Superficial de la Confluencia del Río Tarqui y Yanuncay Aplicando la Técnica LSPIV**". Como parte

de este trabajo conjunto, se participó en las campañas de aforo llevadas a cabo en la zona de estudio, lo que permitió obtener mediciones representativas para la correcta calibración del modelo.



Ilustración 20. Campañas de aforo, medición de caudales y velocidades. (Fuente; Propia)

Dichas campañas permitieron obtener mediciones directas de caudales en distintos periodos y condiciones hidrológicas, proporcionando una base confiable para la calibración. Las campañas de aforo se realizaron en el invierno en el mes de febrero del año 2024, y a inicios del verano a finales del mes de abril del mismo año. Durante el desarrollo de dichas campañas los caudales en los ríos mantuvieron niveles bajos, debido a la presencia de una sequía hidrológica en la ciudad.

En la primera campaña de aforo, el caudal medido del río Tarqui fue de $1.1642 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el del río Yanuncay fue de $1.413 \text{ m}^3/\text{s}$. En la segunda campaña, se obtuvieron caudales de $2.6533 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Yanuncay y $1.776 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Tarqui.

Al contar con estos datos experimentales, se pueden ajustar las condiciones de entrada del modelo numérico en IBER, asegurando que las simulaciones reflejen fielmente el comportamiento del flujo en la confluencia.

3.4.3. Proceso de validación y verificación del modelo

En este apartado se describe cómo se procesan y estructuran todos los datos necesarios en el software IBER para la modelación hidrodinámica bidimensional de la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay. Este procedimiento abarca la comprobación del funcionamiento adecuado de las ecuaciones y algoritmos del modelo, así como la validación de los resultados obtenidos al compararlos con datos reales medidos en campo.

A partir del MDT el cual es importado a IBER por medio de una de sus herramientas denominada RTIN en la cual se establecen los parámetros para el comportamiento de la geometría tanto de los ríos, la confluencia y la vegetación alrededor de estos. Los parámetros asignados se establecieron en una tolerancia de 0.10 metros la cual ajusta la superficie manteniendo cada detalle del MDT original, un lado mínimo de 1 metro para áreas con mucha variación en su pendiente como su rugosidad y un lado máximo de 10 metros para zonas más uniformes.

3.4.4. Condiciones de contorno

Condiciones de entrada

Dentro de IBER, para las condiciones a la entrada de ambos ríos se ingresa los caudales base sacados de las diferentes campañas de aforo, considerándolos constantes para la modelación. Además, se opta por un régimen crítico/subcrítico ya que existe una zona de

transición donde el flujo puede desplazarse desde situaciones controladas hacia un sistema de mayor velocidad (la confluencia de los ríos).

Para el modelo, se implementa una simulación máxima de 15.000 segundos con resultados cada 20 segundos y un procesamiento de 10 núcleos con el objetivo de optimizar el rendimiento en simulaciones complejas con mallas de alta resolución como el presente trabajo.

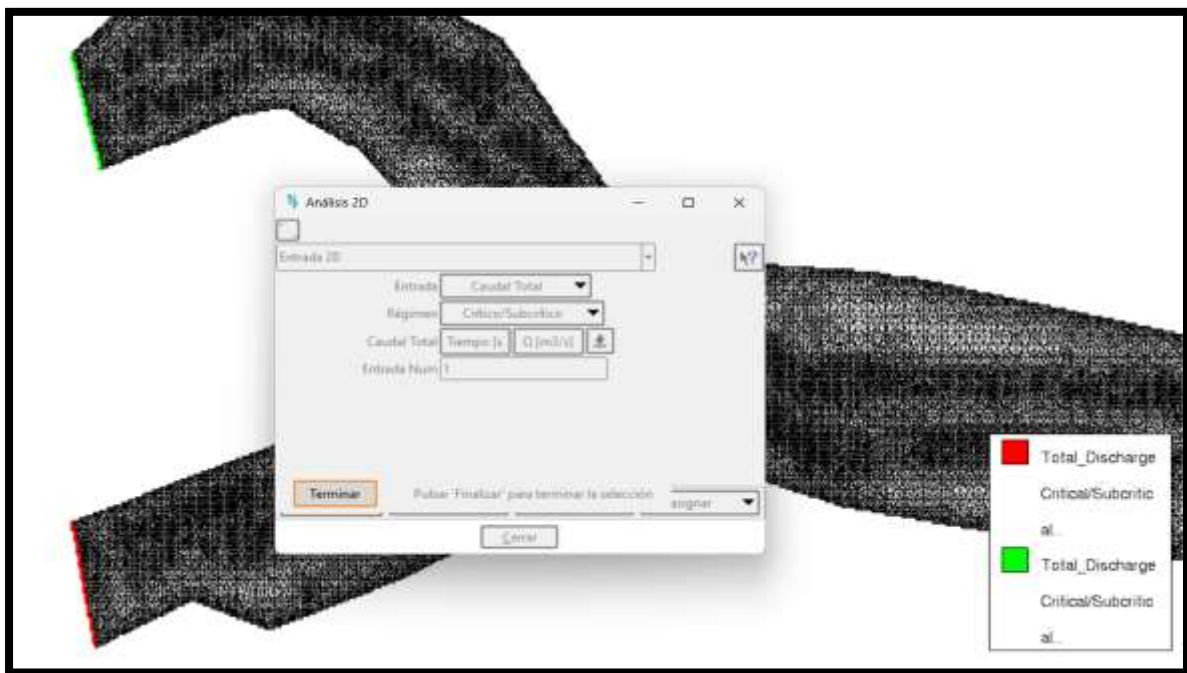


Ilustración 21. Modelación bidimensional, Condiciones de entrada. (Fuente; Propia)

La ilustración previa expone el ingreso de las condiciones de entrada del flujo en la zona descrita con anterioridad. Para facilitar su visualización, las secciones de los ríos Tarqui y Yanuncay se distinguen en la imagen con los colores rojo y verde, respectivamente. El área de ingreso se delimita manualmente excluyendo los bordes, para evitar que otras fuentes de entrada de flujo que puedan afectar el comportamiento del modelo.

Condiciones de salida

De igual manera se define la condición a la salida del modelo como régimen Supercrítico/Crítico ya que dentro del modelo ocurre una aceleración del flujo debido a la confluencia de ambos Ríos, lo que significa que la velocidad del agua aumenta conforme avanza, dentro de estas condiciones se considera una elevación de 2501.23m.s.n.m presente en el área de salida del cauce.

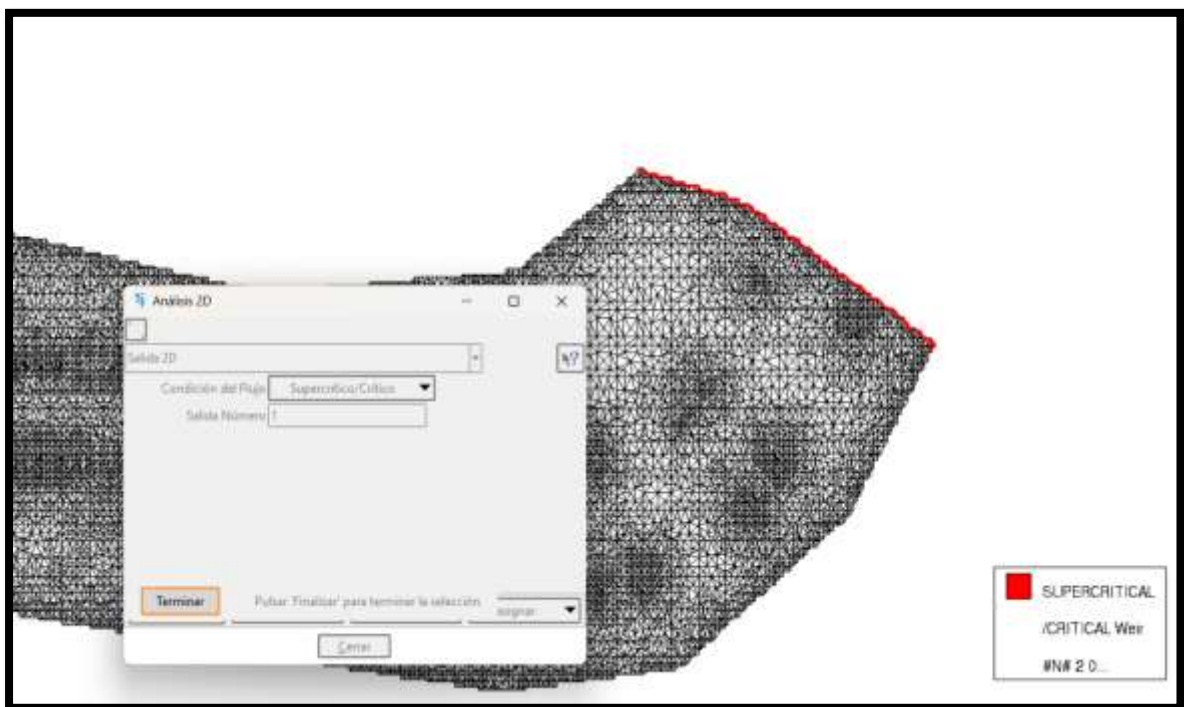


Ilustración 22. Modelación bidimensional, Condiciones de salida. (Fuente; Propia)

La imagen anterior expone las condiciones de salida de flujo ingresadas al sistema de acuerdo con los parámetros descritos con anterioridad. El área de salida se ubica al final en el cauce resultante de la confluencia de los dos ríos de la zona de estudio. Para su mejor visualización se le asigna un color rojo, evitando definir secciones en los bordes, con la finalidad de garantizar una única ruta de salida y evitar errores en modelación.

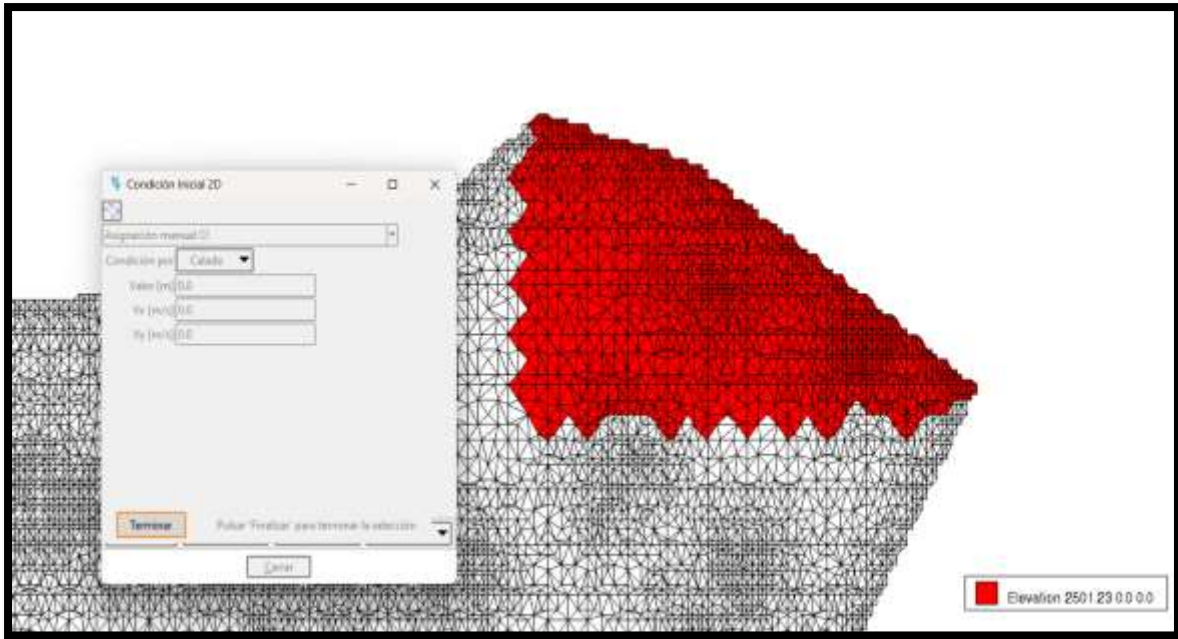


Ilustración 23. Modelación bidimensional, Elevación en la zona de salida. (Fuente; Propia)

La designación de la elevación presente en la salida del flujo, basada en el MDT permite la representación más precisa de la topografía del área en la modelación hidráulica. Al asignar esta condición se garantiza que el flujo se descargue de forma coherente, según la morfología del cauce, evita discrepancias en la dirección del flujo y dentro de los resultados. Además, esto influye en sus velocidades y el comportamiento del agua al salir de la zona debido a la pendiente hidráulica.

Mallado no estructurado

La etapa de mallado es crucial en la modelación numérica, puesto que establece la resolución espacial con la que se representa el flujo en la simulación. En esta investigación, se elabora una malla no estructurada, creada específicamente para capturar de manera precisa la interacción hidráulica en la convergencia de los ríos Tarqui y Yanuncay.

La construcción de la malla se realiza siguiendo un criterio progresivo. En áreas donde se espera una mayor variabilidad en la dinámica del flujo, como en la confluencia y en las márgenes de los cauces, se utilizan elementos más pequeños para mejorar la resolución de los cálculos. En cambio, en sectores con menor complejidad geométrica, se emplea elementos más grandes para optimizar los tiempos de procesamiento sin comprometer la calidad de la simulación generando un total de 91.553 elementos y 46.888 nodos para el modelado total de la malla.

Cada celda del modelo fue asignada a un tipo de superficie específico, lo que permite relacionarla con los coeficientes de rugosidad previamente definidos. De esta manera, se logra representar de manera más realista la variabilidad del terreno y su influencia en la dinámica del flujo como se puede apreciar en la siguiente ilustración.

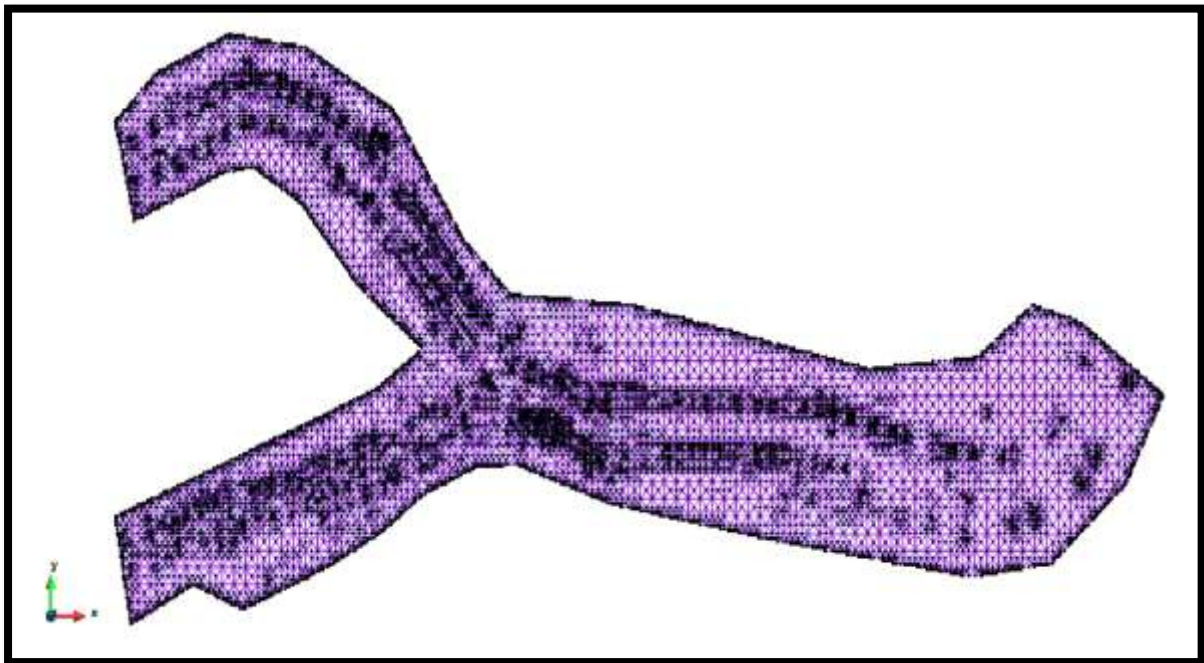


Ilustración 24. Modelo Bidimensional, Mallado no estructurado. (Fuente; Propia)

La discretización del dominio por medio de elementos triangulares permite representar con una mayor precisión la interacción hidráulica entre los cauces de los ríos Tarqui y Yanuncay con su confluencia. En los márgenes del río y en la confluencia, donde se espera más variación en la dinámica del flujo se evidencian los elementos más pequeños y, en áreas con menos complejidad hidráulica estos son más grandes optimizando el tiempo de análisis sin afectar la calidad en la simulación.

Asignación de coeficientes de rugosidad

La asignación de los coeficientes de rugosidad se realiza de manera manual dentro del software IBER. Pese a que el software proporciona valores establecidos previamente, se requiere la personalización de estos parámetros, dado que los datos derivados de mediciones in situ, análisis granulométricos y fotometrías presentan variaciones con respecto a los valores predeterminados.

Uno de los elementos cruciales en este procedimiento es la congruencia entre los coeficientes de rugosidad asignados y los datos presentes en el archivo ASCII generado anteriormente en ArcGIS. Todo desajuste entre estos datos podría perjudicar la estabilidad del modelo u obstaculizar su adecuada implementación. Por esta razón, se realiza una validación detallada para asegurar que cada valor de rugosidad se adecue a la superficie correcta dentro del área simulada, asegurando que la modelación hidrodinámica considerara la heterogeneidad del terreno y asevera la fiabilidad de los resultados obtenidos.



Ilustración 25. Ingreso manual de valores de rugosidad. (Fuente; Propia)

Al asignar los valores de rugosidad que serán aplicados en el modelo, su ingreso en el sistema del programa es indispensable, verificando que las etiquetas empleadas para cada una de las rugosidades sean acordes a los archivos que se ingresan al software. La imagen previa, describe las rugosidades que serán utilizadas en el modelo con respecto específicamente al lecho y a la vegetación presente en los márgenes que los rodean.

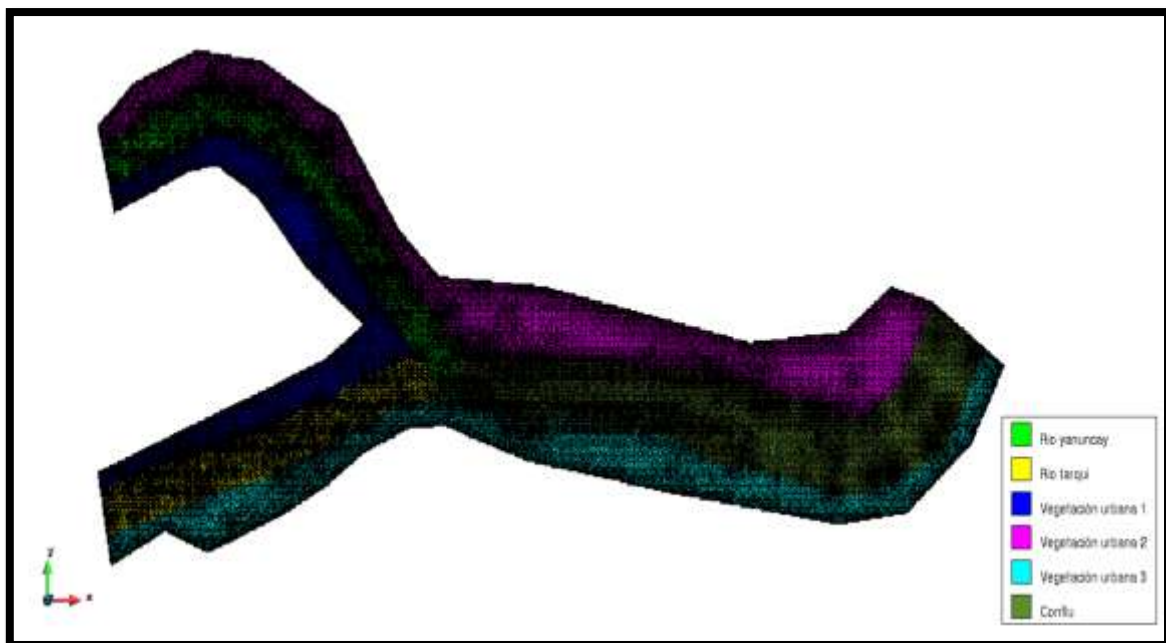


Ilustración 26. Asignación de la rugosidad al modelo. (Fuente; Propia)

La asignación de los distintos valores de rugosidades ingresados al sistema es fundamental para proporcionar realismo a la influencia del terreno en la hidráulica del flujo, asegurando una representación precisa de los patrones de velocidad, turbulencia y el transporte de sedimentos del área. Para visualizar fácilmente las distintas rugosidades establecidas, el programa las simboliza por medio de colores según el área donde han sido fijadas; Río Yanuncay (verde), Río Tarqui (amarillo), Confluencia (verde oscuro), vegetación urbana 1 (azul), vegetación urbana 2 (rosado) y vegetación urbana 3 (celeste).

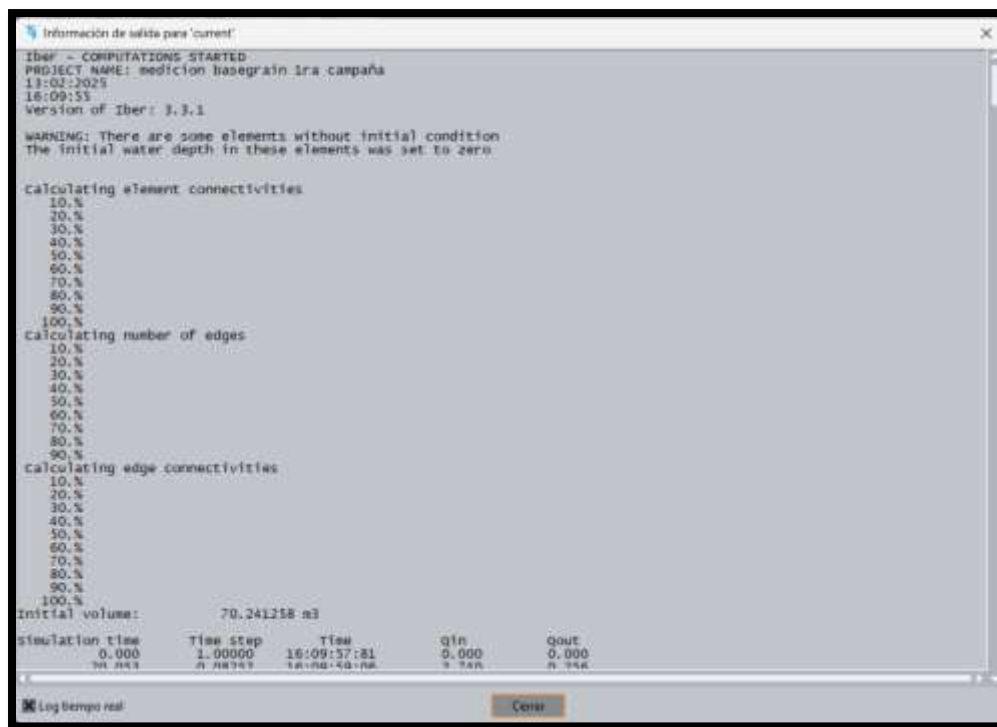


Ilustración 27. Procesamiento de información. (Fuente; Propia)

Finalmente, para la validación correcta del modelado se verifica que el programa corra de manera que no presente ningún mensaje de error en sus parámetros iniciales y esté cumpliendo premisas propuestas al mismo.

CAPITULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Características granulométricas y coeficientes de rugosidad obtenidos

El análisis por fotometría realizado por medio del software BaseGrain de las secciones de los ríos Tarqui, Yanuncay y la Confluencia, con las modificaciones de escala y parámetros en análisis descritos previamente, define el diámetro de las partículas seleccionadas como material del lecho y, con base en ellos define una curva granulométrica de la composición presente la zona de estudio.

4.1.1. Río Tarqui Sección 1

El análisis granulométrico del Río Tarqui en su Sección 1 se expresan por medio de curvas de distribución de sedimentos con respecto a su diámetro. Estas curvas permiten caracterizar la composición del material presente en la sección de análisis de este lecho.

Las curvas de distintos colores que se muestran en la siguiente ilustración corresponden a resultados de distintos métodos de análisis. La curva azul representa el análisis fotográfico inicial y la rosa muestra la distribución final posterior al refinamiento del procesamiento. Por otro lado, la curva de color verde corresponde a datos que se obtendrían por un muestreo en campo, permitiendo comparar la precisión del método respecto a una medición física.

Los valores característicos (D_{10} , D_{50} , D_{90}) que se indican en el gráfico proporcionan valores para la distribución por tamaño:

- D_{10} : El 10% del material es más fino que este diámetro.
- D_{50} (diámetro medio o mediana): El 50% del material es más fino y el 50% más grueso.

- D_{90} : El 90% del material es más fino que este diámetro.

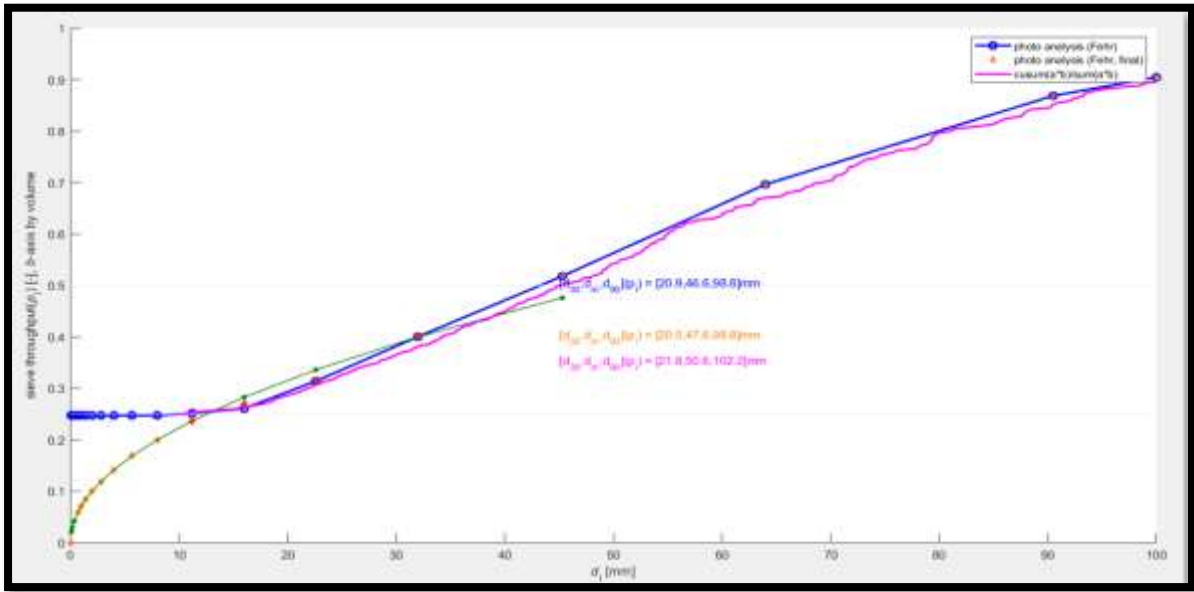


Ilustración 28. Curva granulométrica del Río Tarqui (Sección 1). (Fuente; Propia)

Con base en los resultados obtenidos del análisis granulométrico (Anexo 1) se define un diámetro de partícula máximo de 139,42 mm, un diámetro mínimo de partícula de 2mm y un diámetro de partícula D_{90} de 98,824 mm, con el empleo de esta última y la aplicación de la ecuación de Meyer-Peter Müller la Sección 1 del río Tarqui presenta una rugosidad hidráulica de 0.02583.

Tabla 3.

Rugosidad del Río Tarqui (Sección 1). (Fuente; Propia)

	Dn	Manning
Dm90	0.098824282	0.025838118
Dm (max)	0.139429765	0.027363786
Dm (min)	0.002	0.013488239

4.1.2. Río Tarqui Sección 2

En la Sección 2 del río Tarqui, el proceso de análisis y sus resultados se presentan en formato similar a la sección previa, continuando con la misma metodología asegurando coherencia en la caracterización del lecho.

Las curvas graficadas muestran la distribución del tamaño de los sedimentos comparando el análisis fotográfico inicial y final con valores de referencia. Se utilizan los valores de D_{10} , D_{50} y D_{90} , para evaluar la composición del material y su influencia en la rugosidad del lecho.

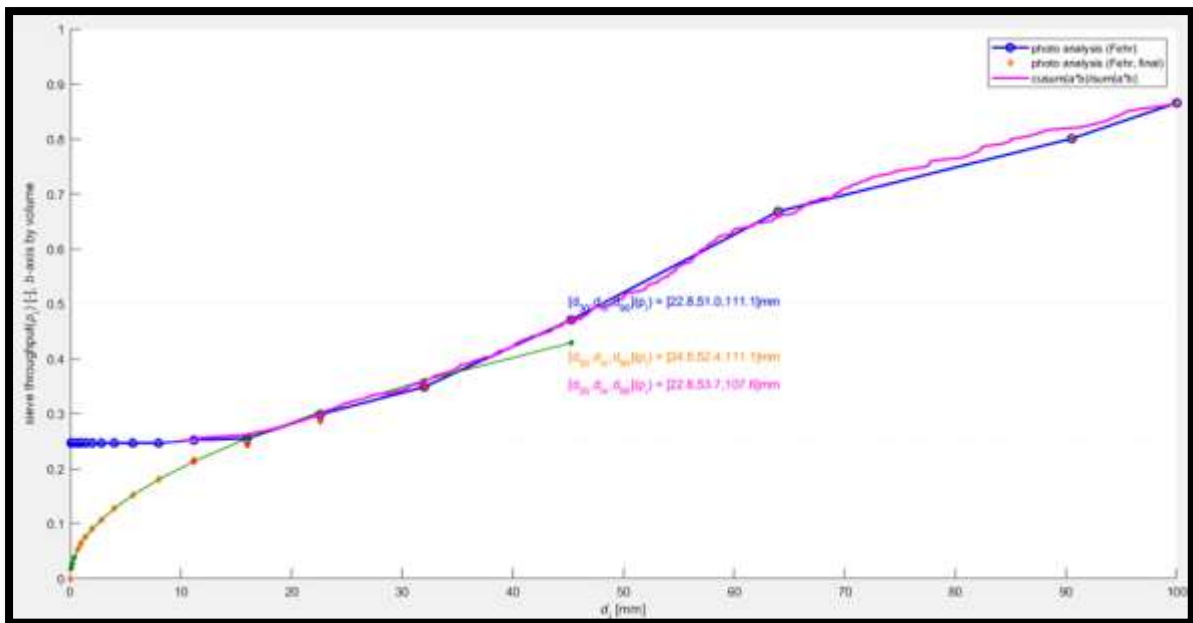


Ilustración 29. Curva granulométrica del Río Tarqui (Sección 2). (Fuente; Propia)

A partir de los resultados conseguidos por el análisis granulométrico (Anexo 2) se determinan los diámetros de partículas de máximo 170,17 mm, un diámetro mínimo de 2,4 mm y un diámetro de partículas D_{90} de 111,09 mm, el cual es empleado para calcular una rugosidad en la Sección 2 del río Tarqui de 0.02634.

Tabla 4.

Rugosidad del Río Tarqui (Sección 2). (Fuente; Propia)

	Dn	Manning
Dm90	0.11109	0.02635
Dm (max)	0.17016	0.02829
Dm (min)	0.00248	0.01398

Con los valores obtenidos en las Secciones 1 y 2 del río Tarqui, se establece una rugosidad hidráulica promedio entre las dos mencionadas de 0.02609.

4.1.3. Río Yanuncay Sección 1

Al igual que en análisis previos, el estudio del material presenta curvas de distribución del tamaño de los sedimentos presentes en la Sección 1 del río Yanuncay, comparando el análisis fotográfico inicial y final con respecto a datos referenciales de muestreo. La curva granulométrica generada como resultado del análisis realizado con el programa, revela una mayor dispersión de resultados atribuida a la abundante presencia de partículas pequeñas. Sin embargo, también se evidencia la persistencia de material de pequeño tamaño.

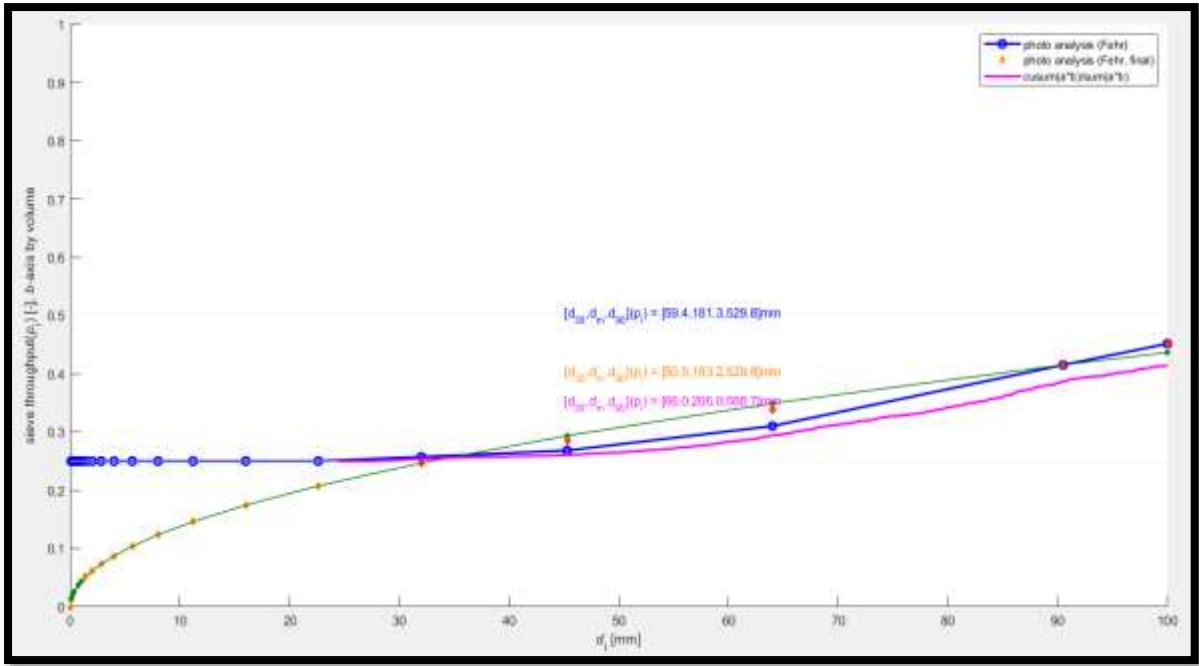


Ilustración 30. Curva granulométrica del Río Yanuncay (Sección 1). (Fuente; Propia)

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico (Anexo 3) establecen diámetros de partículas entre los 5,27 y los 727,98 mm, con un diámetro de partícula D_{90} de 529,83 mm, el cual es empleado a la ecuación de Meyer-Peter Müller determinando que el lecho del río Yanuncay en la Sección 1 de análisis presenta una rugosidad hidráulica de 0.034182.

Tabla 5.

Rugosidad del Río Yanuncay (Sección 1). (Fuente; Propia)

	Dn	Manning
Dm90	0.529832994	0.034182731
Dm (max)	0.727983299	0.036041581
Dm (min)	0.005275571	0.015854839

4.1.4. Río Yanuncay Sección 2

La siguiente ilustración presenta los resultados del procesamiento efectuado para el análisis granulométrico de la Sección 2 del Río Yanuncay. Al igual que en los resultados anteriores, se muestra las curvas de distribución de tamaño de sedimentos del análisis fotográfico con respecto a datos de referencia por muestreo y análisis en laboratorio.

Los resultados evidencian una mayor dispersión de partículas finas, sugiriendo un lecho poco uniforme; sin embargo, se mantiene la presencia de material de tamaño reducido, lo cual influye en la rugosidad de fondo del lecho.

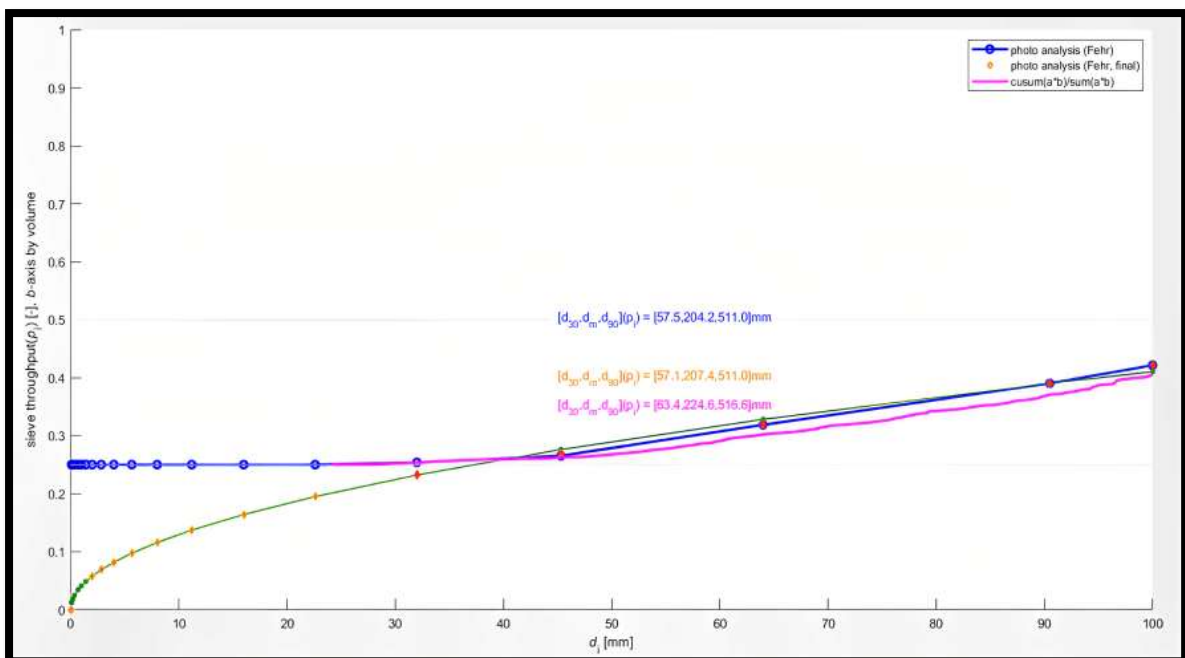


Ilustración 31. Curva granulométrica del Río Yanuncay (Sección 2). (Fuente; Propia)

Los resultados obtenidos a través del análisis granulométrico (Anexo 4) determinan diámetros de las partículas del lecho entre los 5,96 y 934,82 mm, con un diámetro D_{90} de 511 mm, con el cual se establece una rugosidad en la Sección 2 del río Yanuncay de 0.033977.

Tabla 6.*Rugosidad del Río Yanuncay (Sección 2). (Fuente; Propia)*

	Dn	Manning
Dm90	0.511004834	0.033977214
Dm (max)	0.934829303	0.037575576
Dm (min)	0.005962744	0.016181718

Los valores reflejados en las secciones 1 y 2 del río Yanuncay, definen una rugosidad hidráulica promedio entre las dos mencionadas de 0.03407.

4.1.5. Confluencia Sección 1

En la Sección 1 de la Confluencia se realiza el análisis detallado de la composición del material del lecho por medio de curvas granulométricas. Este análisis refleja la presencia de material grueso en el lecho, lo cual tiene un impacto significativo en la resistencia al flujo del cauce.

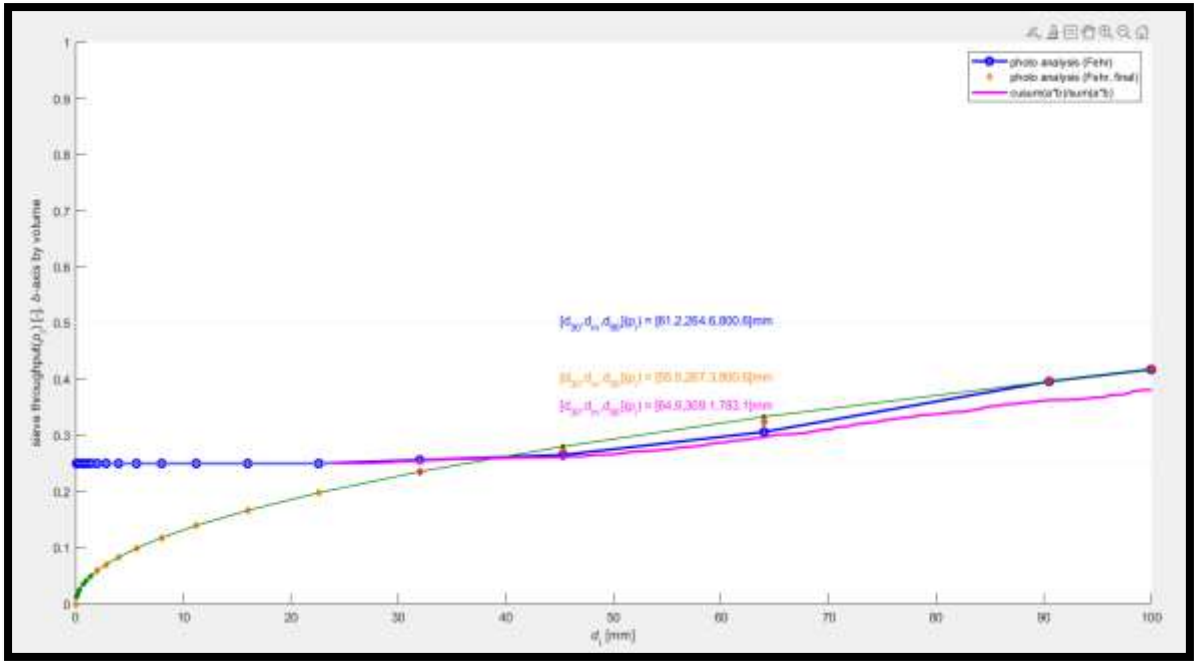


Ilustración 32. Curva granulométrica de la Confluencia (Sección 1). (Fuente; Propia)

Los resultados obtenidos con la curva granulométrica y el cuadro de análisis (Anexo 5) definen el rango de diámetros para esta sección entre los 5,78 y 980,05 mm, con un valor D_{90} de 800,5 mm, y determina una rugosidad hidráulica calculada con Meyer-Müller de 0.03661 en la sección 1 de la confluencia.

Tabla 7.

Rugosidad de la Confluencia (Sección 1). (Fuente; Propia)

	Dn	Manning
Dm90	0.800575324	0.036617101
Dm (max)	0.980057532	0.037872635
Dm (min)	0.005779809	0.016097898

4.1.6. Confluencia sección 2

Finalmente, el análisis granulométrico de la Sección 2 de la confluencia replica el procedimiento anterior para la obtención de los resultados de distribución de tamaño de sedimentos del lecho utilizando curvas de distribución del análisis fotométrico y su comparación con valores de referencia. Los diámetros de las partículas y su distribución sugieren una baja presencia de material grueso, con lo cual la resistencia al flujo disminuye.

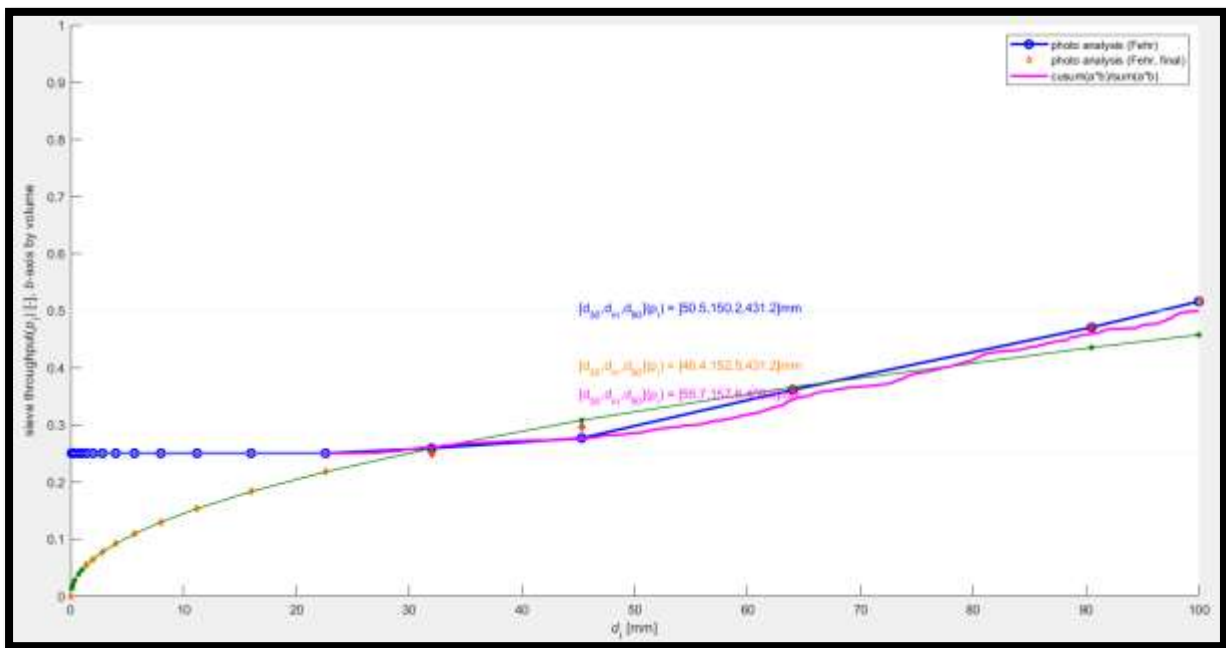


Ilustración 33. Curva granulométrica de la Confluencia (Sección 2). (Fuente; Propia)

Los resultados obtenidos a través del análisis granulométrico (Anexo 6) muestran el rango de diámetro de partículas presentes entre 4,8 y 698,54 mm con un D₉₀ que será empleado en el cálculo de 431,18 mm para esta sección, dando como resultado una rugosidad en la Sección 2 de la Confluencia de 0.03302.

Tabla 8.*Rugosidad de la Confluencia (Sección 2). (Fuente; Propia)*

	Dn	Manning
Dm90	0.431181532	0.033028863
Dm (max)	0.698542975	0.035794458
Dm (min)	0.004815914	0.015615769

Los valores evidenciados en la sección 1 y 2 de la Confluencia, determinan una rugosidad hidráulica promedio entre las dos mencionadas de 0.03482.

A continuación, el cuadro resumen presenta los valores de rugosidades calculadas por medio del análisis por fotometría y el método Meyer-Müller, junto con las rugosidades de vegetación urbana preestablecidas por Cowan previamente, con respecto a la cantidad de vegetación presente en los márgenes de los ríos en las zonas de control.

Tabla 9.*Rugosidades establecidas por el método de Cowan y fotometría. (Fuente; Propia)*

PARAMETRO	RUGOSIDAD
Río Tarqui	0.02609
Río Yanuncay	0.03407
Confluencia	0.03482
Vegetación Urbana 1	0.032
Vegetación Urbana 2	0.018
Vegetación Urbana 3	0.01

4.2. Validación del modelo numérico en la confluencia

La asignación de rugosidades y caudales descritos previamente, junto con las condiciones iniciales del programa, dan como resultado la modelación bidimensional del cauce. Esta modelación brinda valores cada 20 segundos, especificando las características hidrodinámicas del flujo, entre las cuales se encuentran: calado, número de Froude, caudal específico, velocidades y cota de agua.

La validación de los modelos numéricos se realiza con base en las velocidades obtenidas, dependiendo del método para el cálculo de rugosidad (medición in situ, análisis granulométrico y fotometría), con respecto a las recolectadas en la primera campaña de aforo. El modelo se valida evaluando la correlación existente entre las velocidades simuladas por el modelo bidimensional y las obtenidas por LSPIV, utilizando índices estadísticos como: el error absoluto medio (MAE), y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), permitiendo la cuantificación del grado de correlación entre resultados.

El índice MAE, señala la distancia promedio existente entre las velocidades simuladas respecto a las observadas. Por otro lado, el RMSE, al incrementar las diferencias a grado cuadrático previo a su mediación, otorga un mayor peso a los errores de mayor magnitud. Por último, el índice R^2 mide la proporción de la variabilidad de los datos del modelo, donde una mayor tendencia a 1 señala una correlación más positiva

El punto de control del Río Tarqui en la primera campaña de aforo (Anexo 8), presenta valores variantes de velocidad a lo largo del ancho del lecho, dentro de los cuales algunos se encuentran entre los 0.73 y 0 m/s en los bordes del lecho en las abscisas 2 y 11.7 metros y valores de 0.67, 0.34 y 0.11 m/s en el medio del cauce medidos con el método LSPIV en las abscisas 4, 6 y 8 metros, respectivamente.

Por otro lado, el punto de control situado en el Río Yanuncay establece velocidades entre 0.6169 y 0.1414 m/s en bordes en las abscisas 2 y 16 metros y velocidades de 0.1014, 0.3407 y 0.6739 m/s en el centro del tramo en las abscisas 8, 12 y 14 metros, respectivamente.

El punto de control de aforo en la Confluencia determina las velocidades presentes en los bordes de 1.01 y 0.1744 m/s pertenecientes a las abscisas 7 y 23 metros. En cuanto al centro del lecho las velocidades se encuentran entre 1.2433, 1.261 y 0.9246 m/s, en las abscisas 11, 15 y 17 metros, respectivamente.

4.2.1. Velocidades asignando rugosidades obtenidas del método de medición in situ

El modelo bidimensional del cauce, asignando la rugosidad de fondo calculada con la metodología de medición in situ, establece velocidades de flujo en intervalos de $3.7892e^{-5}$ m/s y 2.8148 m/s. En la imagen se puede observar la dinámica del flujo en los diferentes puntos de control y a lo largo de todo el trayecto de los ríos y su confluencia.



Ilustración 34. Velocidad aplicando rugosidad en medición in situ, Caudal de la primera campaña de aforo.

(Fuente: Propia)

La velocidad a lo largo del trayecto se mantiene dentro de sus valores más bajos en el lecho, a excepción de algunos puntos a lo largo del cauce en ciertas zonas de la trayectoria, donde la misma incrementa a sus valores más elevados, esto se debe a la morfología como tal de la zona.

En la siguiente ilustración, se muestran las velocidades resultantes del modelo numérico en los distintos puntos de control descritos, al cual se le asignaron las rugosidades calculadas con la metodología de mediciones in situ.

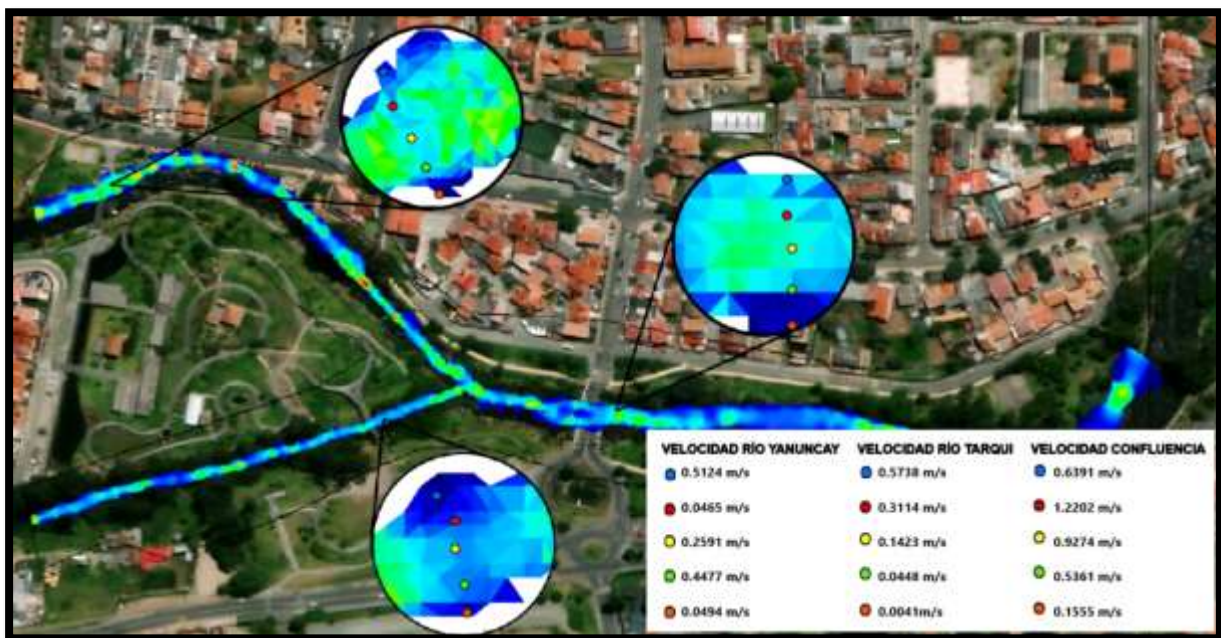


Ilustración 35. Velocidades resultantes aplicando las rugosidades por método de medición in situ. (Fuente; Propia)

La gráfica muestra la variación de la velocidad del flujo a lo largo del trayecto y, con base en los puntos de control de aforo, presenta las velocidades obtenidas mediante la modelación bidimensional.

En el río Tarqui, la simulación arroja velocidades en los bordes del lecho de 0.5738 m/s y 0.0041 m/s, mientras que en el centro estos parámetros varían entre 0.3114 m/s, 0.1423 m/s y 0.0448 m/s. Dentro de este río, las velocidades del flujo se mantienen dentro de sus rangos de bajo a intermedio, con una cantidad reducida de puntos donde presentan incrementos bruscos. A lo largo de su trayectoria, las variaciones de velocidad se mantienen relativamente constantes dentro de estos rangos.

Tabla 10.

Análisis estadísticos de correlación, Río Tarqui (medición in situ). (Fuente; Propia)

ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN	
Error medio absoluto (MAE)	0.15636
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.9309
Coefficiente de determinación (R^2)	0.8666
Error cuadrático medio (RMSE)	0.19816435

Al analizar los resultados de la medición in situ, se observa que el error medio absoluto (MAE) es de 0.15636, lo que señala que, en promedio, la discrepancia entre las velocidades observadas y las simuladas es mínima. El coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0.9309 muestra una fuerte relación entre ambos conjuntos de datos, corroborando la exactitud del modelo. Adicionalmente, el coeficiente de determinación (R^2) indica que el 86.66% de la variabilidad con las mediciones reales puede explicarse por el modelo, lo que señala un ajuste apropiado.

No obstante, el error cuadrático medio (RMSE) de 0.1981 indica que existen diferencias puntuales entre las velocidades modeladas y las observadas, lo que podría ser

resultado de pequeñas anomalías en el cauce o de fluctuaciones en las condiciones hidráulicas que el modelo no registra con total exactitud.

En el río Yanuncay, las velocidades alcanzadas en los bordes son de 0.5124 m/s y 0.0494 m/s, mientras que en la franja centro del tramo se registran valores de 0.0465 m/s, 0.2591 m/s y 0.4477m/s. Debido a la morfología de este cauce, a lo largo de la trayectoria es visible un incremento de velocidades en zonas puntuales, las cuales llegan a los valores máximos dentro de toda la simulación. Sin embargo, esto no es recurrente dentro del trayecto que sigue el flujo.

Tabla 11.

Análisis estadísticos de correlación, Río Yanuncay (medición in situ). (Fuente; Propia)

ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN	
Error medio absoluto (MAE)	0.12246
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.9741
Coefficiente de determinación (R^2)	0.9488
Error cuadrático medio (RMSE)	0.13721572

El río Yanuncay presenta una dinámica distinta, los resultados de la medición in situ muestran un error medio absoluto (MAE) de 0.12246, lo que señala una diferencia promedio menor entre las velocidades simuladas y observadas en comparación con el río Tarqui. Esto sugiere un incremento en la exactitud del modelo en este tramo. Además, el coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0.9741 es notablemente elevado, lo que corrobora que las velocidades modeladas se ajustan de manera bastante precisa a las reales.

El coeficiente de determinación (R^2) refleja que el 94.88% de la variabilidad en los datos observados es explicada por el modelo, lo que denota una excelente capacidad predictiva. Igualmente, el error cuadrático medio (RMSE) de 0.1372 es inferior al Río Tarqui, señalando que las diferencias entre las velocidades medidas y las simuladas son menores.

En la confluencia de los ríos, el modelo determina velocidades en bordes de 0.6391 m/s y 0.1555 m/s, mientras que, en su centro los valores varían entre 1.2202 m/s, 0.9274 m/s y 0.5361 m/s. Comparando estos resultados, con los valores alcanzados en los tramos individuales de los otros dos ríos, se evidencia un incremento en su velocidad, llegando a los niveles medios, lo cual concuerda con el comportamiento esperado por su condición de confluencia.

Tabla 12.

Análisis estadísticos de correlación, Confluencia (medición in situ). (Fuente; Propia)

ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN	
Error medio absoluto (MAE)	0.22708
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.9663
Coefficiente de determinación (R^2)	0.9337
Error cuadrático medio (RMSE)	0.283187471

En la confluencia, la simulación muestra un incremento en la velocidad del flujo en comparación con los tramos individuales de los ríos Tarqui y Yanuncay. Los resultados obtenidos en la medición in situ muestran un error medio absoluto (MAE) de 0.22708, el cual es el más elevado entre los tres casos analizados. Esto señala que el modelo tiene mayores dificultades para predecir con precisión las velocidades en esta zona. Sin embargo, el

coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0.9663 continúa siendo alto, lo que muestra que las tendencias de las velocidades simuladas y observadas están alineadas.

El coeficiente de determinación (R^2) señala que el modelo explica el 93.37% de la variabilidad en los datos observados, lo que indica un ajuste global adecuado, aunque con algunos márgenes de error. Esto se manifiesta en el error cuadrático medio (RMSE) de 0.28318, el más elevado de los tres segmentos analizados, indicando que en ciertas áreas las discrepancias entre los valores modelados y los observados son más pronunciadas.

4.2.2. Velocidades aplicando la rugosidad obtenida con el método de análisis granulométrico.

El modelo numérico asignado al cauce, con la rugosidad de fondo determinada mediante el análisis granulométrico del material, establece sus velocidades de flujo mínimo de $4.7069 \text{ e}^{-5} \text{ m/s}$ y una velocidad máxima registrada de 2.873 m/s.

La ilustración muestra la dinámica del flujo a lo largo de toda la trayectoria, en la cual se mantiene el comportamiento en la mayor parte de la trayectoria velocidades en sus valores de bajo a intermedios y, únicamente en ciertos puntos se incrementan hasta su nivel máximo.



Ilustración 36. Velocidad aplicando rugosidad por análisis granulométrico, Caudal de la primera campaña de aforo. (Fuente; Propia)

La siguiente gráfica se exponen las velocidades obtenidas en este modelo numérico con base en las condiciones de rugosidad preestablecida por el análisis granulométrico de su material de lecho.

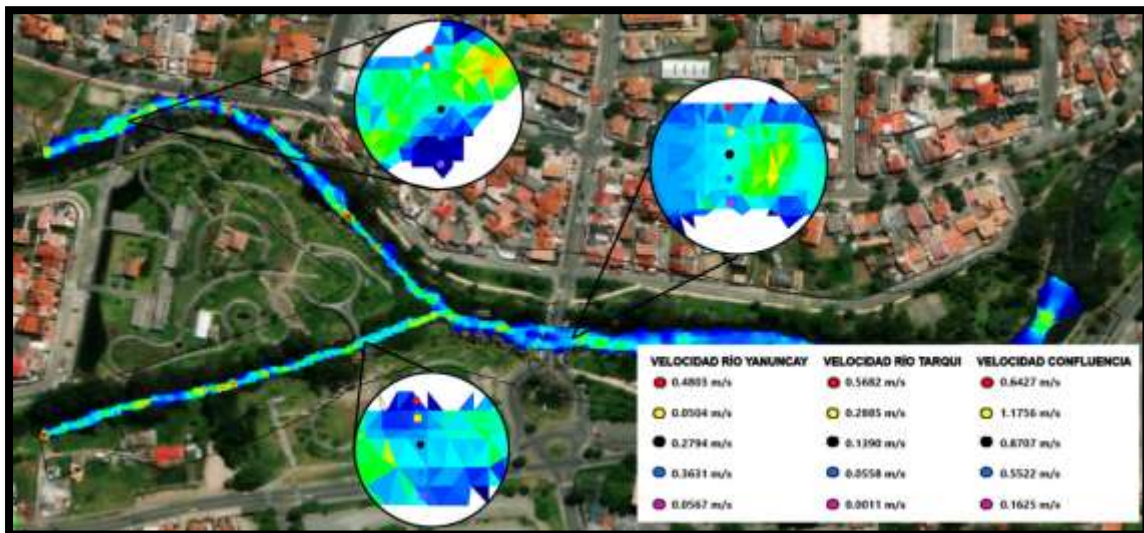


Ilustración 37. Velocidades resultantes aplicando las rugosidades por método de análisis granulométrico.

(Fuente; Propia)

La ilustración previa expone las velocidades presentes en los puntos de control y la dinámica del flujo en toda su trayectoria. En el río Tarqui, las velocidades presentes en los bordes son de 0.5682 m/s y 0.0011 m/s, mientras que, en su centro los valores varían entre 0.2885 m/s, 0.1390 m/s y 0.0558 m/s. Estos resultados se encuentran dentro del rango bajo hasta medio de las velocidades observadas en la trayectoria. En este caso, se puede identificar un mayor número de zonas donde la velocidad sufre un incremento, lo cual se le atribuye a la rugosidad presente, y su influencia en el flujo.

Tabla 13.

Análisis estadísticos de correlación, Río Tarqui (medición Granulométrica). (Fuente; Propia)

ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN	
Error medio absoluto (MAE)	0.15992
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.9173
Coefficiente de determinación (R^2)	0.8414
Error cuadrático medio (RMSE)	0.20739399

Los resultados obtenidos en las mediciones granulométricas evidencian una concordancia aceptable con los valores observados en campo. El Error medio absoluto (MAE) de 0.15992 indica que, en promedio, las discrepancias entre los valores simulados y los medidos son relativamente bajas. Además, el coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0.9173 refleja una fuerte relación lineal entre los datos simulados y observados, lo que muestra que el modelo captura de manera adecuada la tendencia de las velocidades en este tramo.

Por otro lado, el coeficiente de determinación R^2 confirma que el modelo explica cerca del 84.14% de la variabilidad de los datos, lo que indica un ajuste bastante adecuado. Finalmente, el error cuadrático medio RMSE de 0.20739 confirma que las diferencias entre los valores estimados y los reales son mínimas. Sin embargo, en contraste con los resultados obtenidos en las mediciones in situ (RMSE = 0.1981), se observa un ligero incremento en la dispersión de los errores.

Al analizar el punto de control del río Yanuncay, los resultados establecen velocidades en los bordes de entre 0.4803 m/s y 0.0567 m/s, mientras que en el centro su velocidad varía entre 0.0504 m/s, 0.2794 m/s y 0.3631m/s; En comparación con el río Tarqui, se puede observar un incremento en los niveles de velocidad, manteniéndose dentro del nivel medio con tendencia al aumento en varios puntos a lo largo de su recorrido.

Tabla 14.

Análisis estadísticos de correlación, Río Yanuncay (medición Granulométrica). (Fuente; Propia)

ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN	
Error medio absoluto (MAE)	0.13950
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.9501
Coefficiente de determinación (R^2)	0.9027
Error cuadrático medio (RMSE)	0.17094766

El río Yanuncay, presenta un Error medio absoluto (MAE) de 0.13950, indicando una menor diferencia promedio entre los valores simulados y los medidos en comparación con el río Tarqui. Además, el coeficiente de correlación de Pearson ($R = 0.9501$) evidencia una

fuerte relación lineal, lo que sugiere que el modelo logra representar con alta precisión la tendencia de las velocidades en este tramo.

El coeficiente de determinación R^2 muestra que el modelo explica aproximadamente el 90.27% de la variabilidad de los datos recolectados, mejorando la capacidad predictiva en comparación con el río Tarqui. Finalmente, un error cuadrático medio de 0.17095 que muestra dispersiones más bajas en relación con las mediciones reales.

Las velocidades en la confluencia de los ríos los valores se sitúan alrededor de entre los 0.6427 m/s y 0.1625 m/s en los márgenes, por otro lado, en el centro del cauce sus velocidades oscilan entre 1.1756 m/s, 0.8707 m/s y 0.5522 m/s. Comparando estos resultados con los obtenidos de los otros dos ríos, se observa una variación en los niveles de las velocidades a lo largo del trayecto manteniéndose dentro del rango medio. Aunque no se observan incrementos bruscos en el trayecto el comportamiento es coherente con el esperado en una confluencia.

Tabla 15.

Análisis estadísticos de correlación, Confluencia (medición Granulométrica). (Fuente: Propia)

ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN	
Error medio absoluto (MAE)	0.25400
Coeficiente de correlación de Pearson (R)	0.9639
Coeficiente de determinación (R^2)	0.9292
Error cuadrático medio (RMSE)	0.310283754

En la confluencia de los ríos, los resultados granulométricos reflejan una notable precisión en la determinación de velocidades. El Error medio absoluto dio como resultado

0.25400, es el más alto entre los tres puntos analizados, dando una mayor diferencia promedio entre los valores simulados y los medidos. En cuanto al coeficiente de correlación de Pearson, se obtuvo un resultado de 0.9639 indicando una excelente relación lineal entre los datos simulados y observados.

Por su lado, el coeficiente de determinación R^2 , muestra que el modelo explica aproximadamente el 92.92% de la variabilidad de los datos. Sin embargo, el error cuadrático medio RMSE es igual a 0.31028, y es mayor en comparación con los otros tramos, lo que sugiere una mayor dispersión de los errores en la estimación de las velocidades.

4.2.3. Velocidades asignando rugosidad obtenidas del método de fotometría

La próxima ilustración presenta las velocidades de flujo, resultantes del modelo bidimensional, al cual se le ha asignado rugosidades establecidas con el método de fotometría. En esta imagen se evidencian velocidades a lo largo de la trayectoria, dentro de un rango de $1.2593e^{-5}$ m/s y 2.9097 m/s.

Los valores mínimos de velocidad se registran en zonas de estancamientos, mientras que, al igual que en los casos anteriores, las velocidades bajas e intermedias predominan en la mayor parte de la trayectoria. Por otro lado, las condiciones morfológicas de la zona causan la presencia de las velocidades más elevadas en puntos específicos del cauce.



Ilustración 38. Velocidad aplicando rugosidad por fotometría, Caudal de la primera campaña de aforo. (Fuente; Propia)

Las velocidades obtenidas por medio del modelo bidimensional se presentan en la próxima ilustración, en donde se toma como referencia los puntos de control y aforo para la comparación de velocidades resultantes con las obtenidas al emplear el método LSPIV.

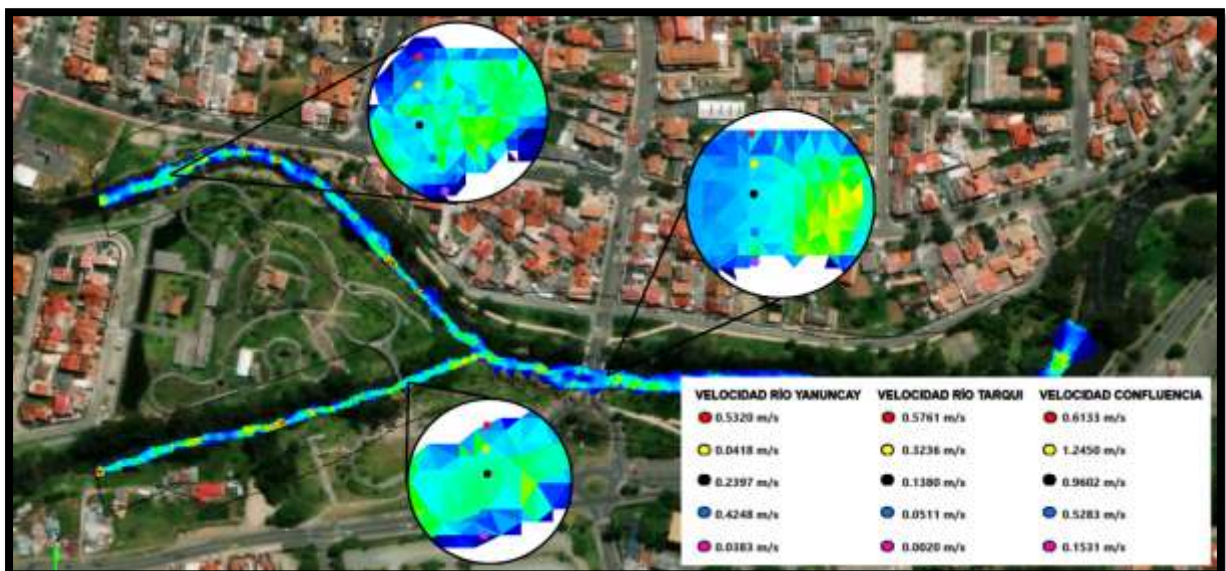


Ilustración 39. Velocidades resultantes aplicando las rugosidades por método de fotometría. (Fuente; Propia)

Las velocidades resultantes presentes en el punto de control del río Tarqui se establecen en 0.5761 m/s y 0.0020 m/s en los bordes del lecho, mientras que en el centro alcanzan los valores entre 0.3236 m/s, 0.1380 m/s y 0.0511 m/s. Al analizar estos valores, se puede observar que se mantienen dentro de los rangos bajo e intermedio y, dentro del recorrido del cauce se presencia el incremento de velocidades hasta sus niveles máximos en zonas previas al punto de control y a niveles altos en zonas previas a la confluencia.

Tabla 16.

Análisis estadísticos de correlación, Río Tarqui (medición por fotometría). (Fuente; Propia)

ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN	
Error medio absoluto (MAE)	0.15264
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.9351
Coefficiente de determinación (R^2)	0.8744
Error cuadrático medio (RMSE)	0.19388418

Los valores obtenidos mediante fotometría en el río Tarqui reflejan una notable precisión en la estimación de velocidades. El Error medio absoluto MAE de 0.15264 es menor que en las mediciones anteriores, lo que sugiere una menor desviación promedio entre los datos medidos y los calculados. Además, el coeficiente de correlación de Pearson $R = 0.9351$ evidencia una relación altamente consistente entre las observaciones y las simulaciones, reforzando la exactitud del modelo en este sector.

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo logra representar con un 87.44% de exactitud la variabilidad del flujo, superando en precisión a los métodos previos. Asimismo, el error cuadrático medio $RMSE = 0.19388$ es más bajo, en comparación con los

obtenidos en las metodologías anteriores. lo que sugiere una menor dispersión de los errores y una mejor capacidad predictiva en este método.

En el caso del río Yanuncay, la velocidad arrojada en los bordes es de 0.5320 m/s y 0.0383 m/s, mientras que en el centro del cauce la velocidad que alcanza oscila entre 0.0418 m/s, 0.2397 m/s y 0.4248 m/s. La velocidad en este trayecto permanece dentro de su rango medio; sin embargo, existe mayor presencia de zonas con incremento brusco de velocidad.

Tabla 17.

Análisis estadísticos de correlación, Río Yanuncay (medición por fotometría). (Fuente; Propia)

ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN	
Error medio absoluto (MAE)	0.11816
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.9792
Coefficiente de determinación (R^2)	0.9589
Error cuadrático medio (RMSE)	0.1258456

En este tramo, los resultados obtenidos por fotometría presentan un desempeño superior en términos de precisión y concordancia con los valores medidos. El Error medio absoluto MAE = 0.11816 es el más bajo entre los tres puntos analizados, lo que demuestra una gran exactitud en la estimación de velocidades. De igual manera, el coeficiente de correlación de Pearson R = 0.9792 es excepcionalmente alto, confirmando una correspondencia casi perfecta entre los valores observados y los modelados.

Por su parte, el coeficiente de determinación R^2 revela que el modelo explica el 95.89% de la variabilidad de los datos, destacando un nivel de precisión superior a los obtenidos mediante otros métodos. Además, el error cuadrático medio RMSE = 0.12585 es el

más bajo entre todas las mediciones, lo que implica que las diferencias entre los valores reales y los estimados son prácticamente insignificantes.

Finalmente, en la confluencia de los ríos, las velocidades en los bordes son de 0.6133 m/s y 0.1531 m/s, y en el centro del lecho presenta velocidades de 1.2450 m/s, 0.9602 m/s y 0.5283 m/s. Al comparar estos resultados, con los obtenidos en los otros dos ríos, se evidencia una variación en los niveles de velocidad en el trayecto lo cual es consistente con la conducta en una confluencia, manteniéndose dentro del rango bajo y medio, sin evidencia visual de incrementos bruscos.

Tabla 18.

Análisis estadísticos de correlación, Confluencia (medición por fotometría). (Fuente; Propia)

ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE CORRELACIÓN	
Error medio absoluto (MAE)	0.21544
Coefficiente de correlación de Pearson (R)	0.9649
Coefficiente de determinación (R^2)	0.9311
Error cuadrático medio (RMSE)	0.275159343

Los resultados fotométricos en la confluencia presentan una notable precisión en la representación de las velocidades del flujo, con un Error medio absoluto MAE de 0.21544, ligeramente mayor que en los tramos individuales, lo que puede atribuirse a la mayor complejidad hidráulica en esta zona. No obstante, el coeficiente de correlación de Pearson ($R= 0.9649$) mantiene una relación muy fuerte entre los datos simulados y medidos.

El coeficiente de determinación R^2 señala que el 93.11% de la variabilidad de los datos es explicada por la simulación, lo que refleja un ajuste muy preciso en este sector.

Aunque el error cuadrático medio RMSE de 0.27516 es mayor que en los tramos individuales, sigue siendo menor que los obtenidos con las otras metodologías

La aplicación de los tres métodos aplicados al cálculo de la rugosidad de fondo, y la comparación de sus resultados en las modelaciones realizadas, permiten evaluar el desempeño y precisión del modelo numérico en la representación del comportamiento del flujo con base en su velocidad. La coherencia presente entre los valores registrados, y los datos medidos en campo en los puntos de control de los ríos Tarqui, Yanuncay y la Confluencia de ambos, indican que el modelo representa de forma correcta la dinámica del flujo en la zona de estudio.

Para seleccionar el método de cálculo de rugosidades más adecuado, se comparan los valores de índices de correlación MAE, RMSE y R^2 obtenidos en cada una de las simulaciones, priorizando a aquel que reduzca el MAE y RSME, maximizando el valor de R^2 , lo que señala un rendimiento superior del modelo al representar la dinámica del flujo en la confluencia.

Con base en los resultados obtenidos, se determina que la rugosidad calculada por medio del análisis por fotometría es la más cercana a la realidad presente en el área, pues la variación presentada en comparación con los valores registrados por la metodología LSPIV registrados es menor.

4.3. Variaciones y comportamiento de la rugosidad en diferentes condiciones

La aplicación de la rugosidad calculada mediante análisis por fotometría genera los resultados con menor grado de variación al comparar con los obtenidos en las campañas de aforo. El cambio de caudales presentes dentro de un cauce influye de forma directa en la

variación del comportamiento de la rugosidad, lo que a su vez afecta la resistencia al flujo y, por consiguiente, a las velocidades resultantes. Con el aumento de caudal, la rugosidad tiende a disminuir debido a la mayor energía del flujo, reduciendo la influencia generada por las irregularidades del lecho. Contrario a esto, en caudales bajos, la rugosidad tiende a incrementarse, pues el flujo interactúa más con las irregularidades presentes en el fondo del lecho.

Para analizar la variación en el comportamiento de este parámetro, se aplican al modelo bidimensional distintos caudales base en los ríos Tarqui y Yanuncay, obtenidos, al igual que en un inicio, por medio del método LSPIV. Los resultados permiten evaluar la manera en que la rugosidad responde a esta variación de caudal y el impacto que genera en la distribución de las velocidades en el cauce.

La modelación bidimensional del cauce en análisis con las condiciones de rugosidad determinada mediante la fotometría del material del lecho, junto al caudal base obtenido de la primera campaña de aforo indicada previamente, reiterando que sus caudales de entrada base son: en el Rio Yanuncay $1.413 \text{ m}^3/\text{s}$ y Rio Tarqui $1.1642 \text{ m}^3/\text{s}$

Las velocidades presentes en el cauce al aplicarse los caudales predefinidos y manteniendo una rugosidad constante, expresan velocidades en el centro de las secciones transversales de los tres puntos de apoyo con valores entre bajos e intermedios a lo largo de toda la trayectoria, a excepción de puntos en específicos donde por la morfología del lugar la velocidad se incrementa a sus niveles más elevados. En el Rio Tarqui la velocidad obtenida en un aproximado al centro de la sección oscila entre 0.3236 m/s y 0.0511 m/s , en el caso del Rio Yanuncay esta varía entre 0.0418 y 0.4248 m/s y, en la Confluencia de ambos se encuentra aproximadamente entre 1.2450 m/s y 0.5283 m/s . Como se mencionó previamente, estas velocidades tienen una variación mínima con respecto a las obtenidas por LSPIV.

A continuación, se expresan las velocidades resultantes del modelo bidimensional en el cual se mantiene la asignación de rugosidades, pero se distingue del proceso previo debido al aumento de caudales de entrada para los ríos Tarqui y Yanuncay provenientes de los datos obtenidos en una segunda campaña de aforos, en el caso del Río Yanuncay de $2.6533 \text{ m}^3/\text{s}$, para el Río Tarqui $1.7769 \text{ m}^3/\text{s}$.



Ilustración 40. Velocidad aplicando rugosidad por fotometría, Caudal de la segunda campaña de aforo. (Fuente; Propia)

La comparación de velocidades para el caso de la segunda campaña de aforo en el método de fotometría analiza los resultados obtenidos en las abscisas 2, 8, 12, 14 y 16 metros en la sección del río Yanuncay, las abscisas 2, 4, 6, 8 y 10 metros en la sección transversal del río Tarqui y finalmente, las abscisas 6, 8, 10, 12 y 14 metros. En el siguiente gráfico, se exponen las velocidades alcanzadas al incrementar los caudales de entrada en el modelo, en los puntos de control que se emplearon en todos los procedimientos previos.

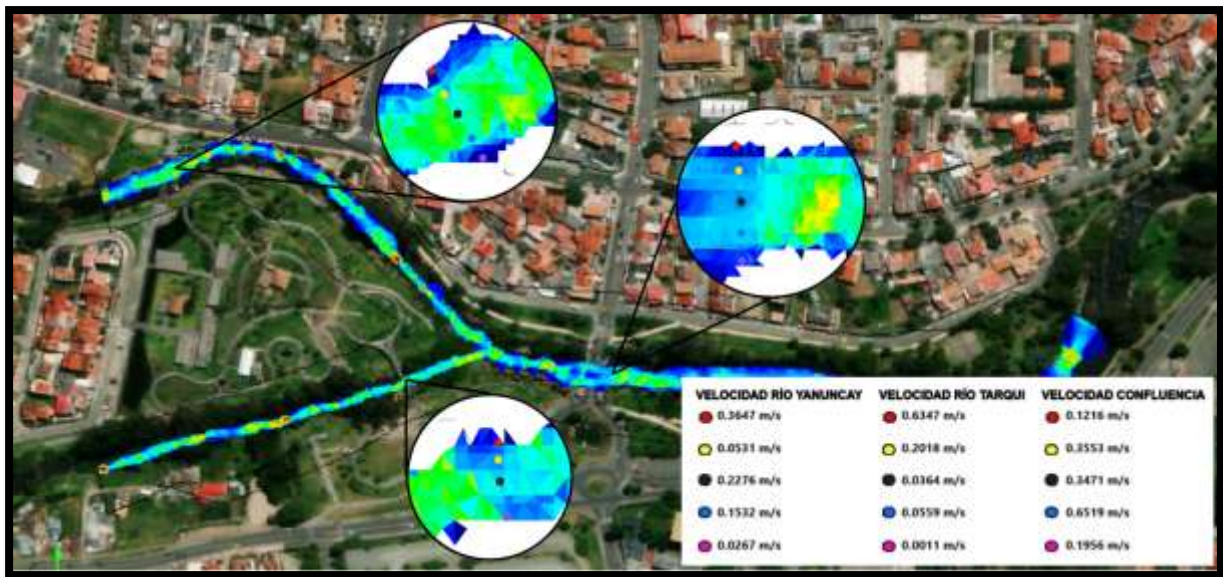


Ilustración 41. Velocidades, rugosidad por fotometría en caudal base 2. (Fuente; Propia)

La imagen anterior describe la velocidad del flujo del cauce en toda su trayectoria al incrementar el caudal base en los niveles especificados, aunque manteniendo las rugosidades calculadas en los distintos ríos como constante.

Las velocidades obtenidas por el modelo bidimensional en el centro de las secciones transversales de los puntos de control se han incrementado con respecto de la modelación previa. En este caso, el Río Tarqui cuenta con velocidades de 0.2018 m/s y 0.0559 m/s, el centro de la sección en Río Yanuncay alcanza una velocidad de 0.815 m/s y, en el punto de Confluencia esta llega a 1.1258 m/s.

Al analizar el comportamiento en los dos ríos, el aumento de velocidad es mayor en el caso del río Yanuncay, en el cual las zonas donde la velocidad llega a sus valores más altos son más comunes, lo cual puede relacionarse a su pendiente y configuración. De igual manera, la Confluencia sufre un incremento de su velocidad debido al aumento del volumen de agua y la aceleración del flujo, debido a su característica propia, como la unión de dos ríos, donde el aumento de este parámetro es esperado.

A medida que el caudal aumenta, la resistencia al flujo que ofrece la rugosidad de fondo debido al material del lecho y sus irregularidades disminuye, reduciendo su impacto sobre la velocidad del cauce. Los resultados obtenidos en la modelación confirman esta la relación caudal – velocidad, ya que la velocidad alcanzada en el centro de las secciones transversales se incrementa al aumentarse el caudal.

El impacto que tiene la rugosidad en la dinámica del flujo es más significativo cuando el caudal es bajo, con lo cual, las irregularidades y el material al fondo del lecho generan una mayor resistencia. Por el contrario, al aumentar el caudal el flujo se vuelve el parámetro dominante y la influencia de la rugosidad se reduce.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La adecuada caracterización de la rugosidad de fondo mejora la precisión de los resultados provenientes de la modelación hidráulica, permitiendo una mejor comprensión del comportamiento del cauce. Se ha demostrado que, para la estimación de la rugosidad de fondo, el empleo del método de análisis por imágenes (fotometría) utilizando el software BaseGrain, para su procesamiento, se destaca en comparación con los métodos tradicionales como la medición in situ y el análisis granulométrico del material de fondo mediante tamizado en laboratorio. Si bien las fechas en las que se tomaron las muestras de granulometría y las imágenes utilizadas en el análisis por fotometría influyen en los resultados por un posible cambio en el flujo y composición del lecho, en este caso, no se evidencio una variación significativa, pues las mencionadas se encuentran cercanas entre sí, y durante este periodo se presentó una sequía hidrológica, la cual causo un comportamiento constante en el caudal del flujo y, por ende, en el material del lecho. El análisis fotométrico permitió una caracterización más detallada del material del fondo, garantizando una representación más precisa de la rugosidad existente en el cauce. Su aplicación resultó efectiva en la zona de confluencia, donde la variación del tamaño de sedimentos es considerable y los métodos tradicionales presentan mayor margen de error.

Al comparar los errores vinculados a cada método de medición, se puede observar que la fotometría brinda los valores más precisos. En el caso del río Yanuncay, el error medio absoluto fue de 0.11816 m/s, en el Tarqui fue de 0.15264 m/s y en la Confluencia 0.21544 m/s, siendo este último un 41.52% superior respecto al Yanuncay, al considerar los errores medio absolutos máximos en cada uno de los puntos. En cuanto al coeficiente de correlación de Pearson, la fotometría demostró una relación más sólida entre los valores modelados y los observados, con valores de 0.9792 en el Yanuncay, 0.9351 en el Tarqui y 0.9649 en la confluencia, sugiriendo una alta confiabilidad del método. El coeficiente de determinación

(R²) alcanzó un 95.89% en el Yanuncay, un 87.44% en el Tarqui y un 93.11% en la confluencia, verificando que la fotometría detalla con mayor precisión la variabilidad de los datos.

Por otro lado, al analizar los errores cuadráticos medios, la fotometría registró valores de 0.1258 m/s en el Yanuncay, 0.1939 m/s en el Tarqui y 0.2752 m/s en la confluencia, lo que detalla una dispersión menor de los valores en relación con los métodos in situ y granulométricos. Esto resulta en una disminución relevante del error de estimación, con un 36.89% menos error en el Yanuncay respecto al Tarqui y un 54.30% menos respecto a la confluencia.

El análisis de la rugosidad y el impacto que esta genera en la dinámica del flujo de los ríos Tarqui, Yanuncay y su confluencia, verifica que el aumento de caudal provoca el incremento de las velocidades del flujo, reduciendo la resistencia que esta impone al flujo. En la modelación inicial, con los caudales base de 1.413 m³/s en el río Yanuncay y 1.1642 m³/s en el río Tarqui, las velocidades alcanzadas en el centro de las secciones transversales fueron moderadas, con valores que oscilaban los 0.3236 m/s y 0.0511 m/s en el río Tarqui, 0.0418 m/s y 0.4248 m/s en el río Yanuncay, y entre 1.2450 m/s y 0.5283 m/s en la confluencia.

Al aumentar los caudales a 2.6533 m³/s en el Yanuncay y 1.7769 m³/s en el Tarqui, las velocidades en cada cauce también lo hicieron. En río Tarqui, la velocidad disminuyó 0.3236 m/s a 0.2018 m/s en la primera sección y de 0.0511 m/s a 0.0559 m/s en la segunda. En el río Yanuncay, el incremento fue más evidente, con velocidades que pasaron de 0.4248 m/s a 0.815 m/s. Finalmente, en la confluencia, la velocidad en el centro del cauce experimentó una reducción de 1.2450 m/s a 1.1258 m/s, lo que se puede atribuir a la disipación de energía y la interacción de ambos flujos al unirse.

La rugosidad influye de manera considerable en la dinámica del flujo cuando el caudal es bajo, dado que las irregularidades del lecho producen mayor resistencia. No obstante, a medida que el caudal aumenta, el flujo adquiere mayor velocidad y el impacto de la rugosidad disminuye gradualmente. Esta conducta es coherente con la teoría hidráulica, que explica que, el aumento de la velocidad es directamente proporcional al aumento del caudal, disminuyendo el impacto del material de fondo sobre la velocidad del flujo.

Con base en los criterios y análisis realizados en este trabajo, se pueden brindar ciertas consideraciones para asegurar un desarrollo de medición de sedimentos, estimación de rugosidades y validación de modelos numéricos para diversas condiciones de contorno y flujo garantizando un correcto funcionamiento.

- La aplicación del software BaseGrain para procesamiento de imágenes, si bien puede ser utilizado en diversas circunstancias, es recomendable emplearlo en ríos con lechos expuestos, pues la calidad y nitidez de la imagen, junto a la exposición de los materiales influye en la precisión del análisis de la granulometría sin necesidad de intervenir directamente en el cauce.
- Se debe llevar a cabo una calibración manual durante el procesamiento en BaseGrain, para garantizar los parámetros de escala y medidas de referencia, optimizando la detección y clasificación de los sedimentos, reduciendo la desviación en la distribución de las partículas por tamaño.
- Es importante que los datos de la morfología fluvial, la topografía del lecho, la rugosidad de fondo y las características del flujo se incorporen de la manera correcta para garantizar simulaciones realistas. En caso de que, el modelo se utilice para simular eventos de alta intensidad, se debe considerar la variación de caudales y condiciones morfológicas.

- La resolución espacial y temporal del modelo se debe adaptar a las características particulares de los ríos. En zonas que presenten altos índices de variabilidad es recomendable emplear una resolución más fina; aunque, al hacerlo también incrementa la demanda computacional, por lo cual se debe equilibrar la precisión con la eficiencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Zucarelli, G. V., & Blas Ceirano, E. (1982). *Determinación de la rugosidad de manning en el tramo medio del Río Paraná*. Argentina: Departamento Hidrología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Obtenido de <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/155/345.pdf>
- Aldana, B., & Tsenkuch, M. (2024). *Caracterización experimental y numérica de la velocidad superficial de la confluencia del río Tarqui y Yanuncay aplicando la técnica del LSPIV*. Cuenca: Universidad Católica de Cuenca.
- Alfaro-Guerra, O.-G. (2019). *Evaluación de la ecuación de Colebrook-White mediante métodos explícitos*. . Ingeniería, Investigación y Tecnología.
- Alvarez Rodas, L., Cordero Peña, C., & Neira Vásquez, C. (1994). *Determinación de los coeficientes de rugosidad de los ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca*. Cuenca-Ecuador: Universidad Estatal de Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/7164>
- ASTM International. (2015). *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. Obtenido de ASTM Designation E11-15.
- Ayala, L., López, A., & Marín, P. (1995). *Factores hidráulicos y mecánicos fluviales condicionantes del control hidrométrico en ríos de montaña*. Chile: Universidad de Chile. Obtenido de <https://iwaponline.com/IA/article-pdf/2/2/63/576290/ia19952678.pdf>
- Bathurst, J. (2002). *At a site variation and minimum flow resistance for mountain rivers*. Obtenido de Journal of Hydrology:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169402001919?via%3Dihub>

Bladé E., C. G.-C. (2012). *Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos.*

Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería.

Bunte, K., & Abt, S. (2001). *Sampling surface and Subsurface Particle-Size Distributions in*

Wadable Gravel- and Cobble- Bed Streams for Analyses in Sediment Transport,

Hydraulics and Streambed Monitoring. Obtenido de United States Department of

Agriculture: [https://www.fs.usda.gov/biology/nsaec/assets/rmrs-gtr-](https://www.fs.usda.gov/biology/nsaec/assets/rmrs-gtr-74samplingsurfacesubsurfacepartszdist.pdf)

[74samplingsurfacesubsurfacepartszdist.pdf](https://www.fs.usda.gov/biology/nsaec/assets/rmrs-gtr-74samplingsurfacesubsurfacepartszdist.pdf)

Carchi Villacís, A. L. (2020). *Modelación de la calidad del agua en un tramo del río*

Yanuncay (desde Pucán hasta la confluencia con el río Tarqui). Cuenca-Ecuador:

Universidad el Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12278>

Cardona, J. E. (2019). *Modelo para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning en*

función de la altura del material del fondo del cauce del río Achiguate-Guacalate.

Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/371150235_Modelo_para_el_calculo_del_c](https://www.researchgate.net/publication/371150235_Modelo_para_el_calculo_del_coeficiente_de_rugosidad_de_Manning_en_funcion_de_la_altura_del_material_del_fondo_del_cauce_del_rio_Achiguate-Guacalate)

[oeficiente_de_rugosidad_de_Manning_en_funcion_de_la_altura_del_material_del_fo](https://www.researchgate.net/publication/371150235_Modelo_para_el_calculo_del_coeficiente_de_rugosidad_de_Manning_en_funcion_de_la_altura_del_material_del_fondo_del_cauce_del_rio_Achiguate-Guacalate)

[ndo_del_cauce_del_rio_Achiguate-Guacalate](https://www.researchgate.net/publication/371150235_Modelo_para_el_calculo_del_coeficiente_de_rugosidad_de_Manning_en_funcion_de_la_altura_del_material_del_fondo_del_cauce_del_rio_Achiguate-Guacalate)

Carlos Rincon, M. P. (2017). *Análisis comparativo entre los modelos HEC-RAS e IBER en la*

evaluación hidraulica de puentes. Venezuela: Universidad Centroccidental Lisandro

Alvarado. doi:1856-9560

Cedillo, J., Timbe, L., Samaniego, E., & Alvarado, A. (2021). *Efecto del refinamiento de la*

descripción de la rugosidad en una aproximación 2D para un río de montaña.

Obtenido de La granja: revista de ciencias de la vida:

<http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/lgr/v33n1/1390-3799-Lgr-33-01-00092.pdf>

Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.

Chow, V. T. (1994). *Hidraulica de canales abiertos*. Obtenido de

<https://webooks.co/images/team/academicos/ingenieria/civil/11.Hidraulica%20de%20Canales%20Abiertos%20-%20Ven%20Te%20Chow.pdf>

Clifford, N. J. (1992). *River channel changes: Advances in geomorphology*. Wiley-Blackwell.

Cowan, W. L. (1956). *Estimating hydraulic roughness coefficients*. Agricultural Engineering.

Cundinamarca, C. A. (2021). *Determinación Experimental de la Rugosidad Absoluta k_s y*

Coficiente de Manning en el Río Bogotá. Colombia. Obtenido de

<https://www.car.gov.co/uploads/files/60ad1de492b66.pdf>

Dayanara Martinez Ramirez, H. S. (2020). *Determinacion del coeficiente de rugosidad del*

río tomebamba mediante formulas empiricas. Cuenca: Universidad el Azuay:

Facultad de ciencia y tecnologia escuela de ingenieria civil.

EP, E. (2021). *Actualización de los estudios Hidrológicos, Planes Maestros de Agua Potable*

y Alcantarillado del área metropolitana de la ciudad de Cuenca. Obtenido de

<https://www.etapa.net.ec/Portals/0/Documentos/licitacion%20publica%20planta%20guangarcucho/ANEXO%205/ANEXO%209.%20Informe%20Hidrologico%20Rio%20Cuenca.pdf>

Escudero, J. S. (2022). *Mapas de peligro por inundación del río Chibunga en el tramo de*

influencia al Parque Lineal ubicado en la ciudad de Riobamba: modelación

hidrodinámica bidimensional del río Chibunga, en el tramo de influencia al parque

lineal ubicado en la ciudad de Rioba. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido

de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23010>

- Espinoza Betancourt, A. M. (2020). *Análisis de la dinámica fluvial en el sector del coliseo Jefferson Pérez mediante modelación bidimensional*. Cuenca-Ecuador: Universidad de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/802dbc94-7957-43b8-92b6-09032bb05fa2>
- Fernández de Córdova Webster, C. J., Rodríguez López, Y., & León Méndez, A. (2020). *Influencia del coeficiente de rugosidad de Manning en las áreas de inundación del río Yanuncay en Cuenca*. Cuenca-Ecuador: Revista de Hidrología y Recursos Hídricos. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/339031427>
- Fernandez Cardona, J. E. (2019). *Modelo para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la altura del material del fondo del cauce del río Achiguate-Guacalate*. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. Obtenido de <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1410/886>
- Fernandez, J. (2022). Modelo para el calculo del coeficiente de rugosidad de Manning en funcion de la altura del material de fondo del cauce del rio Achiguate-Guacalate. *Agua, Saneamiento y ambiente*, pág. Vol. 17.
- Garcia, J., Valdes , R., Ruiz , L., Quintana, R., Cruz, A., & Alvarez, M. (2015). *Uso del procesamiento de imagenes digitales para medir los parametros morfometricos de particular* . Obtenido de BCT INIMET: <https://www.redalyc.org/pdf/2230/223040405003.pdf>
- Gonzalez, R., Santiago, C., Muñoz, A., & Arevalo , K. (2020). *Etudio de rugosidad para diferentes materiales de fondo en canales rectangulares*. Obtenido de ESPOL: https://www.researchgate.net/publication/338565849_Estudio_de_rugosidad_para_diferentes_materiales_de_fondo_en_canales_rectangulares_G2

- ISO . (2000). *Test sieves- Technical requirements and testing*. Obtenido de International standard:
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/25147/3186915722934e2c919c33aabfe3ce8c/ISO-3310-1-2000.pdf>
- Kales, G. (2017). *Rugosidad equivalente en ríos con lecho de gravas en condiciones de flujo de cauce lleno, casos de ríos en Patagonia*. Argentina: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Obtenido de
https://www.researchgate.net/publication/321170837_RUGOSIDAD_EQUIVALENTE_EN_RIOS_CON_LECHO_DE_GRAVAS_EN_CONDICIONES_DE_FLUJO_DE_CAUCE_LLENO_CASOS_DE_RIOS_EN_PATAGONIA
- Knight, D. W. (1996). *River channel and floodplain hydraulics. Floodplain processes, 139-181*.
- Marbello Pérez, R. (2015). *Manual de prácticas de laboratorio de hidraulica*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21725/3353962.2005.Parte%201.pdf>
- Martinez , D., & Solano, H. (2020). *Determinacion del coeficiente de rugosidad del rio Tomebamba mediante formulas empiricas*. Obtenido de UDA:
<https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10272>
- Mendoza, J. J. (2024). *Instructivo de prácticas de laboratorio de modelación numérica para analizar la hidrodinámica del cauces naturales en dos dimensiones mediante el software HEC-RAS*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (25 de mayo de 1948). *Formulas for bed-load transport*.
Obtenido de TU Delft Repository: <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7>
- Millanao, C. (2010). *Determinacion de granulometria de lecho de cauce de montaña a traves del uso de fotografias digitales*. Obtenido de Universidad Austral de Chile:
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2010/bmfcim645d/doc/bmfcim645d.pdf>
- Naranjo, D. P. (2018). *Elaboracion de hidrogramas de crecidas de las cuencas de los rios Tomebamba, Tarqui y Yanuncay desde el año 1997 - 2017*. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Paredes, M., Lavacude, E., & Rodriguez, O. (2021). *Guias teorico-practicas de laboratorios de mecanica de fluidos e hidraulica*. Obtenido de Coleccion Academia:
<https://librosaccesoabierto.uptc.edu.co/index.php/editorial-uptc/catalog/view/181/219/4158>
- Parker, G. & E. (1998). *Sediment Transport: Processes and Principles*. Springer-Verlag.
- Pauta, G., Velasco, M., Gutierrez, D., Vazquez, G., Rivera, S., Morales, O., & Abril, A. (2019). *Evaluación de la calidad del agua de los ríos de la ciudad de Cuenca, Ecuador*. Cuenca-Ecuador: Ingenieria Hidraulica y Ambiental. Obtenido de
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/9069bc7b-37b2-4eea-b223-84d9ef9aaa8f>
- Priego, G., Leon, E., & Rivera, F. (2017). *Corrientes secundarias en una Confluencia*. Mexico: XXIV Congreso Nacional de Hidraulica.
- Salmon, B. G. (2024). *Simulación numérica unidimensional mediante HEC-RAS del tránsito de crecidas del río Gala con y sin obras hidráulicas*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/25774/1/CD%2014607.pdf>

U.S. Army Corps of Engineers. (1995). *HEC-RAS*. Obtenido de

<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

Valdivieso, G. (2018). *La gestión de riesgos en los cursos de agua a nivel cantonal, en el marco de la ordenación territorial: caso de estudio cuenca del río Tarqui*. Cuenca: Universidad de Cuenca.

Villacís, A. L. (2022). *Modelacion de la calidad del agua en un tramo del Río Yanuncay (desde Pucan hasta confluencia con el Río Tarqui) usando HEC-RAS*. Cuenca: Universidad del Azuay.

Wilcock, P. R. (2003). *Surface-based transport model for mixed-size sediment*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), 120-128.

ANEXOS

Índice percentil	Diámetro método Fehr [mm]	Diámetro método Fehr ajustado [mm]	Diam. Promedio (ab) [mm]	Diam. Prom. Ajust. (abb) [mm]	Diam. Equivalente (área) [mm]	Diámetro de área proyectada(área*b) [mm]
0.1000		2.0000				
0.1600		5.1506				
0.3000	20.8708	20.5456	21.8173	33.0396	21.7900	33.0765
0.3500	26.5306	26.5306	28.3205	42.0040	28.2896	42.0580
0.5000	43.2789	43.2789	45.0352	62.2771	45.1111	62.8427
0.6500	59.1490	59.1490	61.1614	79.4626	61.2356	79.6547
0.8400	86.1279	86.1279	88.2553	106.4938	88.4921	106.7633
0.9000	98.8243	98.8243	102.2204	120.0940	103.3917	120.1994
0.9500	120.9909	120.9909	119.7170	128.0649	119.7293	128.1979
0.9800	134.8201	134.8201	127.9639	151.6156	128.0908	151.9322
0.9900	139.4298	139.4298	144.1130	162.3467	144.6150	162.5050
Diam. Medio	27.7534	47.6129	50.6002	63.5115	50.7265	63.7396

Anexo 1. Granulometría Río Tarqui Sección 1. (Fuente; Propia)

Índice percentil	Diámetro método Fehr [mm]	Diámetro método Fehr ajustado [mm]	Diam. Promedio (ab) [mm]	Diam. Prom. Ajust. (abb) [mm]	Diam. Equivalente (área) [mm]	Diámetro de área proyectada(área*b) [mm]
0.10000		2.4776				
0.16000		6.3392				
0.30000	22.8365	24.5072	22.7899	35.1765	22.7856	35.1811
0.35000	32.1333	32.1333	30.6756	45.4013	30.6730	45.4896
0.50000	48.0630	48.0630	48.8673	64.1041	48.9098	64.1441
0.65000	62.2942	62.2942	63.2675	84.9915	63.4165	84.9995
0.84000	96.2754	96.2754	94.3980	117.4478	94.3903	116.9700
0.90000	111.0903	111.0903	107.5765	129.4126	107.4246	129.2914
0.95000	127.1609	127.1609	128.0898	148.5523	128.0779	148.0512
0.98000	136.8033	136.8033	145.4117	170.6467	144.8598	170.4462
0.99000	170.1620	170.1620	165.3940	178.0115	165.1180	177.9112
Diam. Medio	27.75341	52.43914	53.74889	69.13147	53.73877	69.05362

Anexo 2. Granulometría Río Tarqui Sección 2. (Fuente; Propia)

Índice percentil	Diámetro método Fehr	Diámetro método Fehr ajustado	Diam. Promedio (ab)	Diam. Prom. Ajust. (abb)	Diam. Equivalente (área)	Diámetro de área proyectada (área*b)
0.10000		5.2756				
0.16000		13.5467				
0.30000	59.4479	50.4685	65.9729	103.5901	65.8028	102.5280
0.35000	74.0468	67.8541	82.2681	141.4822	81.6399	141.1363
0.50000	116.8580	116.8580	128.1123	270.4560	126.7326	267.3598
0.65000	170.8168	170.8168	188.1025	459.6147	185.6253	450.6419
0.84000	404.9959	404.9959	438.5735	639.4976	435.8856	639.5371
0.90000	529.8330	529.8330	568.7256	664.3721	561.9317	664.9594
0.95000	639.9165	639.9165	658.6653	676.1360	658.9266	676.9444
0.98000	705.9666	705.9666	675.5351	685.5569	676.2573	685.8803
0.99000	727.9833	727.9833	683.6863	688.6972	684.0474	688.8589
Diam. Medio	27.75341	183.18235	205.99600	324.89918	204.49241	323.08441

Anexo 3. Granulometría Río Yanuncay Sección 1. (Fuente; Propia)

Índice percentil	Diámetro método Fehr	Diámetro método Fehr ajustado	Diam. Promedio (ab)	Diam. Prom. Ajust. (abb)	Diam. Equivalente (área)	Diámetro de área proyectada (área*b)
0.10000		5.9627				
0.16000		15.2619				
0.30000	57.4805	57.1303	63.3635	111.7151	63.2718	111.7920
0.35000	75.6247	75.6367	83.5821	156.8922	83.6469	157.6765
0.50000	126.7805	126.7805	135.0996	300.1003	136.0249	300.5443
0.65000	216.8963	216.8963	219.8318	439.7383	221.3245	439.7633
0.84000	429.5385	429.5385	435.5749	686.5182	435.5802	687.8005
0.90000	511.0048	511.0048	516.6278	764.5323	517.9150	765.3337
0.95000	704.8710	704.8710	694.9950	829.5439	696.8498	829.9446
0.98000	869.6586	869.6586	814.7314	868.5509	815.4733	868.7112
0.99000	934.8293	934.8293	854.6435	881.5533	855.0145	881.6334
Diam medio	27.75341	207.39135	224.61963	368.19295	225.31043	368.88278

Anexo 4. Granulometría Río Yanuncay Sección 2. (Fuente; Propia)

Índice percentil	Diámetro método Fehr	Diámetro método Fehr ajustado	Diam. Promedio (ab)	Diam. Prom. Ajust. (abb)	Diam. Equivalente (área)	Diámetro de área proyectada (área*b)
0.10000		5.7798				
0.16000		14.8490				
0.30000	61.2027	55.5045	64.8726	144.3862	64.2128	141.8773
0.35000	76.9325	73.7245	84.5367	246.3941	83.6743	228.5236
0.50000	135.9222	135.9222	158.2164	548.8358	155.9716	536.0389
0.65000	243.1483	243.1483	351.1039	725.7666	334.7355	723.5652
0.84000	659.5827	659.5827	729.3195	806.7572	726.3655	799.4986
0.90000	800.5753	800.5753	783.1378	829.9224	769.6146	825.3858
0.95000	900.2877	900.2877	827.0350	849.2268	821.0892	846.9585
0.98000	960.1151	960.1151	851.9327	860.8094	849.5543	859.9021
0.99000	980.0575	980.0575	860.2319	864.6703	859.0427	864.2166
Diam. Medio	27.75341	267.25301	309.05236	473.95272	302.21772	467.81805

Anexo 5. Granulometría Confluencia Sección 1. (Fuente; Propia)

Índice percentil	Diámetro método Fehr [mm]	Diámetro método Fehr ajustado [mm]	Diam. Promedio (ab) [mm]	Diam. Prom. Ajust. (abb) [mm]	Diam. Equivalente (área) [mm]	Diámetro de área proyectada (área*b) [mm]
0.1		4.815914203				
0.16		12.31282255				
0.3	50.49577536	46.41984329	55.65467417	80.32018778	55.2170531	80.32481639
0.35	61.57701438	60.84569325	65.22549653	107.2494673	65.09179205	107.3690791
0.5	96.70661937	96.70661937	100.7272601	204.3311455	100.223651	205.595126
0.65	142.8484253	142.8484253	154.5932295	298.1016185	154.8304818	305.5649483
0.84	282.6166422	282.6166422	281.0013719	465.8612643	281.4858872	467.905221
0.9	431.1815322	431.1815322	408.9739643	508.7059852	413.0183094	509.9834581
0.95	498.1050364	498.1050364	477.8761137	544.4099192	480.2333386	545.0486557
0.98	647.0859509	647.0859509	539.2187574	565.8322796	540.1616474	566.0877742
0.99	698.5429754	698.5429754	559.6663053	572.9730664	560.1377503	573.1008137
Diam. Medio	27.75341145	152.5174318	157.6468773	248.7654598	158.4504154	250.4230492

Anexo 6. Granulometría Confluencia Sección 2. (Fuente; Propia)

Abcisa (m)	Profundidad (m)	Veocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m^3/s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con moline (m^3/s)
0	-0.356	0.1511	0.03	0.077	0.015
2	-0.446	0.6169	0.55	0.548	0.489
4	-0.213	0.2206	0.094	0.290	0.124
6	-0.121	-0.042	0.01	0.322	0.078
8	-0.205	0.1014	0.042	0.143	0.059
10	-0.166	0.0487	0.016	0.447	0.148
12	-0.399	0.3407	0.231	0.494	0.335
14	-0.307	0.6739	0.414	0.577	0.354
16	-0.242	0.1414	0.044	0.362	0.114
16.6	0	0.0904	0.002	0.000	0.000
Total			1.413		1.72

Anexo 7. Caudal y Velocidades Primera campaña, Yanuncay (Fuente; (Aldana & Tsenkuch, 2024))

Abcisa (m)	Profundidad (m)	Veocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m^3/s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con moline (m^3/s)
0	-0.382	0.31	0.0612	0.410	0.080
2	-0.398	0.73	0.5804	0.514	0.409
4	-0.254	0.67	0.3385	0.612	0.311
6	-0.201	0.34	0.1352	0.394	0.158
8	-0.151	0.11	0.0488	0.150	0.064
11.7	0	0	0	0.000	0.000
Total			1.1642		1.02

Anexo 8. Caudal y Velocidades Primera campaña Tarqui. (Fuente; (Aldana & Tsenkuch, 2024))

Abcisa (m)	Profundidad (m)	Veocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m^3/s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con moline (m^3/s)
3	0	-0.0088	-0.0006	0.000	0.000
5	-0.25	0.2515	0.1273	0.000	0.000
7	-0.32	1.0104	0.6487	0.740	0.475
9	-0.35	0.5318	0.3733	0.648	0.455
11	-0.51	1.2433	1.2756	0.272	0.279
13	-0.22	0.2364	0.1021	0.402	0.174
15	-0.37	1.261	0.9407	0.884	0.659
17	-0.28	0.9246	0.5122	0.502	0.278
19	-0.27	0.3574	0.1909	0.832	0.444
21	-0.41	0.0491	0.0398	0.726	0.588
23	-0.5	0.1744	0.1485	0.374	0.318
24.40	0	0	0	0.000	0.000
Total			4.3585		3.67

Anexo 9. Caudal y velocidades Primera campaña, Confluencia. (Fuente; (Aldana & Tsenkuch, 2024))

Abcisa (m)	Profundidad (m)	Veocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m^3/s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con moline (m^3/s)
0	-0.53	0.084	0.0117	0.015	0.002
1	-0.58	0.746	0.4358	0.669	0.391
2	-0.43	0.935	0.404	0.651	0.281
3	-0.32	0.654	0.2099	0.482	0.155
4	-0.2	0.282	0.0575	0.453	0.092
5	-0.17	0.299	0.0493	0.298	0.049
6	-0.17	0.227	0.0386	0.400	0.068
7	-0.24	0.216	0.0513	0.404	0.096
8	-0.16	0.274	0.045	0.227	0.037
9	-0.25	0.317	0.0792	0.815	0.204
10	-0.31	0.611	0.1863	0.191	0.058
11	-0.41	0.327	0.1326	0.654	0.228
12	-0.52	0.461	0.2373	0.784	0.404
13	-0.42	0.91	0.3849	0.622	0.263
14	-0.23	0.644	0.1455	0.716	0.162
15	-0.37	0.412	0.1531	0.293	0.109
16	-0.26	0.165	0.0301	0.000	0.000
16.4	-0.22	0.048	0.0012	0.000	0.000
Total			2.6533		2.60

Anexo 10. Caudal y velocidades Segunda campaña, Yanuncay. (Fuente; (Aldana & Tsenkuch, 2024))

Abcisa (m)	Profundidad (m)	Veocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m^3/s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con moline (m^3/s)
0	0.000	0.2828	0.0027159	0.000	0.000
0.13	0.591	0.2828	0.0610042	0.340	0.073
0.73	0.508	0.7189	0.3414631	0.415	0.197
2	0.398	0.8225	0.3715479	0.375	0.169
3	0.393	1.0959	0.4306887	0.633	0.249
4	0.214	0.9138	0.1955532	0.695	0.149
5	0.346	0.6458	0.2234468	0.606	0.210
6	0.113	0.2977	0.0336401	0.367	0.041
7	0.221	0.2605	0.0575705	0.739	0.163
8	0.159	0.303	0.048177	0.451	0.072
9	0.065	0.1532	0.009958	0.402	0.026
10	0.065	0.0226	0.0011018	0.133	0.006
10.50	0.000	0.0213	8.653E-05	0.000	0.000
13.30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			1.7769538		1.36

Anexo 11. Caudal y velocidades Segunda campaña, Tarqui. (Fuente; (Aldana & Tsenkuch, 2024))

Abcisa (m)	Profundidad (m)	Veocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m^3/s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con moline (m^3/s)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.85	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	-0.12	0.000	0.000	0.000	0.000
3	-0.24	0.000	0.000	0.237	0.057
4	-0.39	0.3572	0.139	0.287	0.112
5	-0.441	0.4499	0.198	0.693	0.306
6	-0.291	0.4338	0.126	0.618	0.180
7	-0.369	0.9865	0.363	0.925	0.340
8	42-0.	0.866	0.364	0.538	0.226
9	-0.547	1.0739	0.587	0.729	0.399
10	-0.471	0.7603	0.358	0.755	0.355
11	-0.5	0.8646	0.432	0.857	0.429
12	-0.565	1.1328	0.640	1.126	0.636
13	-0.521	0.9267	0.483	0.657	0.342
14	-0.628	0.3298	0.207	0.280	0.176
15	-0.631	0.3819	0.301	0.179	0.141
16.5	-0.249	0.000	0.000	0.000	0.000
16.9	-0.4	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			1.7769538		1.36

Anexo 12. Caudal y velocidades Segunda campaña, Confluencia. (Fuente; (Aldana & Tsenkuch, 2024))

METODO MEDICION IN SITU	VELOCIDADES (m/s)								
	RIO TARQUI								
ABSCISA (m)	LSPIV	MODELO	(OBS - SIM) ²	VARIACION OBS	ABS. VARIACION OBS	VARIACION SIM	Var. OBS ²	Var. SIM ²	VARIACION R
BORDE 1	0.73	0.5738	0.0244	0.36	0.1562	0.3585	0.1296	0.1285	0.1291
CENTRO 1	0.67	0.3114	0.1286	0.3	0.3586	0.0961	0.0900	0.0092	0.0288
CENTRO 2	0.34	0.1423	0.0391	-0.03	0.1977	-0.0730	0.0009	0.0053	0.0022
CENTRO 3	0.11	0.0448	0.0043	-0.26	0.0652	-0.1705	0.0676	0.0291	0.0443
BORDE 2	0	0.0041	0.0000	-0.37	0.0041	-0.2112	0.1369	0.0446	0.0781
VELOCIDAD MEDIA	0.370	0.21528	0.1982	PROMEDIO O ABS.VARIACION	0.15636	SUMATORIA VAR OBS ²	0.4250	0.2168	0.28255

Anexo 13. Análisis de velocidades simuladas con respecto al LSPIV, Medición in situ. (Fuente; Propia)

METODO MEDICION IN SITU	VELOCIDADES (m/s)								
	RIO YANUNCAY								
ABSCISA (m)	LSPIV	MODELO	(OBS - SIM) ²	VARIACION OBS	ABS. VARIACION OBS	VARIACION SIM	Var. OBS ²	Var. SIM ²	VARIACION R
BORDE 1	0.67	0.5124	0.0248	0.3	0.1576	0.2971	0.0900	0.0883	0.0891
CENTRO 1	0.1014	0.0465	0.0030	-0.2686	0.0549	-0.1688	0.0721	0.0285	0.0453
CENTRO 2	0.3407	0.2591	0.0067	-0.0293	0.0816	0.0438	0.0009	0.0019	-0.0013
CENTRO 3	0.6739	0.4477	0.0512	0.3039	0.2262	0.2324	0.0924	0.0540	0.0706
BORDE 2	0.1414	0.0494	0.0085	-0.2286	0.0920	-0.1659	0.0523	0.0275	0.0379
VELOCIDAD MEDIA	0.385	0.2630	0.13722	PROMEDIO ABS.VAR	0.12246	SUMATORIA VAR OBS ²	0.3076	0.2002	0.2417

Anexo 14. Análisis de velocidades simuladas con respecto al LSPIV, Medición in situ. (Fuente; Propia)

METODO MEDICION IN SITU	VELOCIDADES (m/s)								
	CONFLUENCIA DE YANUNCAY CON TARQUI								
ABSCISA (m)	LSPIV	MODELO	(OBS - SIM) ²	VARIACION OBS	ABS. VARIACION OBS	VARIACION SIM	Var. OBS ²	Var. SIM ²	VARIACION R
BORDE 1	1.0104	0.6391	0.1379	0.6404	0.3713	0.4238	0.41011	0.17962	0.27141
CENTRO 1	1.2433	1.2202	0.0005	0.8733	0.0231	1.0049	0.76265	1.00986	0.87760
CENTRO 2	1.261	0.9274	0.1113	0.8910	0.3336	0.7121	0.79388	0.50711	0.63450
CENTRO 3	0.9246	0.5361	0.1509	0.5546	0.3885	0.3208	0.30758	0.10293	0.17793
BORDE 2	0.1744	0.1555	0.0004	-0.1956	0.0189	-0.0598	0.03826	0.00357	0.01169
VELOCIDAD MEDIA	0.923	0.69566	0.28319	PROMEDIO ABS.VAR	0.22708	SUMATORIA VAR OBS ²	2.3125	1.8031	1.97313

Anexo 15. Análisis de velocidades simuladas con respecto al LSPIV, Medición in situ. (Fuente; Propia)

METODO ANALISIS GRANULOMETRICO	VELOCIDADES (m/s)								
	RIO TARQUI								
ABSCISA (m)	LSPIV	MODELO	(OBS - SIM) ²	VARIACION OBS	ABS. VARIACION OBS	VARIACION SIM	Var. OBS ²	Var. SIM ²	VARIACION R
BORDE 1	0.73	0.5682	0.0262	0.3600	0.1618	0.3577	0.1296	0.1279	0.1288
CENTRO 1	0.67	0.2885	0.1455	0.3000	0.3815	0.0780	0.0900	0.0061	0.0234
CENTRO 2	0.34	0.139	0.0404	-0.0300	0.2010	-0.0715	0.0009	0.0051	0.0021
CENTRO 3	0.11	0.0558	0.0029	-0.2600	0.0542	-0.1547	0.0676	0.0239	0.0402
BORDE 2	0	0.0011	0.0000	-0.3700	0.0011	-0.2094	0.1369	0.0439	0.0775
VELOCIDAD MEDIA	0.37	0.2105	0.2074	PROMEDIO ABS.VAR	0.1599	SUMATORIA VAR OBS ²	0.4250	0.2069	0.2720

Anexo 16. Análisis de velocidades simuladas con respecto al LSPIV, Análisis granulométrico. (Fuente; Propia)

METODO ANALISIS GRANULOMETRICO	VELOCIDADES (m/s)								
	RIO YANUNCAY								
ABSCISA (m)	LSPIV	MODELO	(OBS - SIM) ²	VARIACION OBS	ABS. VARIACION OBS	VARIACION SIM	Var. OBS ²	Var. SIM ²	VARIACION R
BORDE 1	0.6700	0.4803	0.0360	0.3000	0.1897	0.2650	0.0900	0.0702	0.0795
CENTRO 1	0.1014	0.0504	0.0026	-0.2686	0.0510	-0.1649	0.0721	0.0272	0.0443
CENTRO 2	0.3407	0.2794	0.0038	-0.0293	0.0613	0.0641	0.0009	0.0041	-0.0019
CENTRO 3	0.6739	0.3631	0.0966	0.3039	0.3108	0.1478	0.0924	0.0219	0.0449
BORDE 2	0.1414	0.0567	0.0072	-0.2286	0.0847	-0.1586	0.0523	0.0251	0.0363
VELOCIDAD MEDIA	0.385	0.24598	0.170947659	PROMEDIO ABS.VAR	0.13950	SUMATORIA VAR OBS ²	0.3076176	0.14853076	0.203087938

Anexo 17. Análisis de velocidades simuladas con respecto al LSPIV, Análisis granulométrico. (Fuente; Propia)

METODO ANALISIS GRANULOMETRICO	VELOCIDADES (m/s)								
	CONFLUENCIA DE YANUNCAY CON TARQUI								
ABSCISA (m)	LSPIV	MODELO	(OBS - SIM) ²	VARIACION OBS	ABS. VARIACION OBS	VARIACION SIM	Var. OBS ²	Var. SIM ²	VARIACION R
BORDE 1	1.0104	0.6427	0.13520329	0.6404	0.3677	0.42742	0.41011216	0.18268786	0.273719768
CENTRO 1	1.2433	1.1756	0.00458329	0.8733	0.0677	0.96032	0.76265289	0.9222145	0.838647456
CENTRO 2	1.261	0.8107	0.20277009	0.891	0.4503	0.59542	0.793881	0.35452498	0.53051922
CENTRO 3	0.9246	0.5522	0.13868176	0.5546	0.3724	0.33692	0.30758116	0.11351509	0.186855832
BORDE 2	0.1744	0.1625	0.00014161	-0.1956	0.0119	-0.05278	0.03825936	0.00278573	0.010323768
VELOCIDAD MEDIA	0.923	0.66874	0.310283754	PROMEDIO ABS.VAR	0.25400	SUMATORIA VAR OBS ²	2.31248657	1.57572815	1.840066044

Anexo 18. Análisis de velocidades simuladas con respecto al LSPIV, Análisis granulométrico. (Fuente; Propia)

METODO ANALISIS FOTOMETRIA	VELOCIDADES (m/s)								
	RIO TARQUI								
ABSCISA (m)	LSPIV	MODELO	(OBS - SIM) ²	VARIACION OBS	ABS. VARIACION OBS	VARIACION SIM	Var. OBS ²	Var. SIM ²	VARIACION R
BORDE 1	0.73	0.5761	0.02368521	0.36	0.1539	0.36558	0.1296	0.133648736	0.1316088
CENTRO 1	0.67	0.3236	0.11999296	0.3	0.3464	0.11308	0.09	0.012787086	0.033924
CENTRO 2	0.34	0.138	0.040804	-0.03	0.2020	-0.07252	0.0009	0.00525915	0.0021756
CENTRO 3	0.11	0.0511	0.00346921	-0.26	0.0589	-0.15942	0.0676	0.025414736	0.0414492
BORDE 2	0	0.002	0.000004	-0.37	0.0020	-0.20852	0.1369	0.04348059	0.0771524
VELOCIDAD MEDIA	0.37	0.21816	0.193884182	PROMEDIO ABS.VAR	0.15264	SUMATORIA VAR OBS ²	0.425	0.2205903	0.28631

Anexo 19. Análisis de velocidades simuladas con respecto al LSPIV, Fotometría. (Fuente; Propia)

METODO ANALISIS FOTOMETRIA	VELOCIDADES (m/s)								
	RIO YANUNCAY								
ABSCISA (m)	LSPIV	MODELO	(OBS - SIM) ²	VARIACION OBS	ABS. VARIACION OBS	VARIACION SIM	Var. OBS ²	Var. SIM ²	VARIACION R
BORDE 1	0.67	0.532	0.019044	0.3	0.1380	0.31672	0.09	0.10031156	0.095016
CENTRO 1	0.1014	0.0418	0.00355216	-0.2686	0.0596	-0.17348	0.072146	0.03009531	0.046596728
CENTRO 2	0.3407	0.2397	0.010201	-0.0293	0.1010	0.02442	0.0008585	0.00059634	-0.000715506
CENTRO 3	0.6739	0.4848	0.03575881	0.3039	0.1891	0.26952	0.0923552	0.07264103	0.081907128
BORDE 2	0.1414	0.0383	0.01062961	-0.2286	0.1031	-0.17698	0.052258	0.03132192	0.040457628
VELOCIDAD MEDIA	0.385	0.26732	0.125845604	PROMEDIO ABS.VAR	0.11816	SUMATORIA VAR OBS ²	0.3076176	0.23496616	0.263261978

Anexo 20. Análisis de velocidades simuladas con respecto al LSPIV, Fotometría. (Fuente; Propia)

METODO ANALISIS FOTOMETRIA	VELOCIDADES (m/s)								
	CONFLUENCIA DE YANUNCAY CON TARQUI								
ABSCISA (m)	LSPIV	MODELO	(OBS - SIM) ²	VARIACION OBS	ABS. VARIACION OBS	VARIACION SIM	Var. OBS ²	Var. SIM ²	VARIACION R
BORDE 1	1.0104	0.6333	0.14220441	0.6404	0.3771	0.41802	0.41011216	0.17474072	0.267700008
CENTRO 1	1.2433	1.245	2.89E-06	0.8733	0.0017	1.02972	0.76265289	1.06032328	0.899254476
CENTRO 2	1.261	0.9802	0.07884864	0.891	0.2808	0.76492	0.793881	0.58510261	0.68154372
CENTRO 3	0.9246	0.5283	0.15705369	0.5546	0.3963	0.31302	0.30758116	0.09798152	0.173600892
BORDE 2	0.1744	0.1531	0.00045369	-0.1956	0.0213	-0.06218	0.03825936	0.00386635	0.012162408
VELOCIDAD MEDIA	0.923	0.70798	0.275159343	PROMEDIO ABS.VAR	0.21544	SUMATORIA VAR OBS ²	2.31248657	1.92201448	2.034261504

Anexo 21. Análisis de velocidades simuladas con respecto al LSPIV, Fotometría. (Fuente; Propia)

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros, **Fernando Javier Sarmiento Pineda** y **Marcia Carolina Zea Vázquez** portadore(a)s de las cédulas de ciudadanía N.º 1105792046 y 0107336620. En calidad de autore(a)s y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Caracterización Experimental y Numérica de la Rugosidad de Fondo en la Confluencia del Río Tarqui con el Río Yanuncay”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 31 de marzo de 2025

F: 
.....
Fernando Javier Sarmiento Pineda
1105792046

F: 
.....
Marcia Carolina Zea Vázquez
0107336620