

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Modelación hidráulica y sedimentación mediante herramientas informáticas del

Río Chalhuanca, 2024

Asesor:

MSc. Maldonado Mendivil, Ángel

Presentado por:

Barreto Condori, Yenifer

Para optar el Título Profesional:

Ingeniero Civil.

Abancay-Apurímac-Perú

2025

Acta de sustentación



**Universidad
Tecnológica de los Andes**



Transformando vidas
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 060

En la ciudad de Abancay, a los veinte seis días del mes de agosto del 2025, siendo las 11:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0709-2025- EPIC-FI-UTEA-SA de fecha 19 de agosto del 2025, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Ing. Cayo Baca, Holguer
Dictaminante :	Dra. Vera Teves, Rosa Marina
Replicante :	Ing. Gamarra Mota, Rubén

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Modelación hidráulica y sedimentación mediante herramientas informáticas del Río Chalhuanca, 2024

Desarrollado por las (los) Bachilleres (es):

Br: Barreto Condori, Yenifer

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Barreto Condori, Yenifer	Aprobada

Siendo las 12:30m horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Ing. Cayo Baca, Holguer

Dictaminante: Dra. Vera Teves, Rosa Marina

Replicante: Ing. Gamarra Mota, Rubén

Abancay 28 de agosto del 2025

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 358

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
Ciudad Universitaria Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565
Filial Andahuaylas, Av. Juan Antonio Trelles N° 513 Teléfono (083) 421752
www.utea.edu.pe

(*) Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban. Art. 18 RGGAT.
(**) 0 a 10: Desaprobado; 11 a 15: Aprobado; 16 a 18: Aprobado Notable; 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

Reporte de similitud

Yenifer Barreto_Condori

CORREGIDO

1_21_10_25_Barreto_Condori_Yenifer_Ingenieria_Civil ok

 Revisión-tesis-C/D

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:546237418

Fecha de entrega

14 ene 2026, 14:54 GMT-5

Fecha de descarga

14 ene 2026, 14:57 GMT-5

Nombre del archivo

CORREGIDO 1_21_10_25_Barreto_Condori_Yenifer_Ingenieria_Civil ok.pdf

Tamaño del archivo

3.4 MB

114 páginas

21.222 palabras

129.559 caracteres



Página 2 de 128 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::3117:546237418


23% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...


Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

19%  Fuentes de Internet

3%  Publicaciones

16%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor	
Apellidos y nombres	: Barreto Condori, Yenifer
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 71919497
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0006-4713-6548
Datos del Asesor	
Apellidos y nombres	: MSc. Maldonado Mendivil, Ángel
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 06788424
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0006-4713-6548
Datos de la investigación	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Civil
Línea de Investigación	: Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	: 2025
Fuente de financiamiento	: Propia
Porcentaje de similitud	: 23%
URL de OCDE	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A Dios por brindarme la vida y la salud, también dedico este trabajo de investigación a mi madre quien, con su apoyo, sabios consejos y cariño incondicional hizo que alcanzara las metas trazadas también dedico esta tesis a mi hermano quien para mi es un ejemplo a seguir y a mis abuelos quienes siempre tuvieron el sueño que sus hijos y nietos sean profesionales.

Agradecimientos

A mi casa de estudios la Universidad Tecnológica de los Andes, la universidad que con mucho esmero tiene la tarea de formar profesionales, contribuyendo con la sociedad y el país, contribuyendo a fomentar la investigación y también al desarrollo.

A los docentes de esta prestigiosa carrera de Ingeniería Civil, que con generosidad y dedicación invirtieron el tiempo, a partir de sus valioso conocimiento y experiencias ayudaron a la formación profesional. Su contribución fue imprescindible para lograr los objetivos.

A mi asesor de tesis M.Sc. Ángel Maldonado Mendivil, cuya orientación ha sido fundamental desde el comienzo de este trabajo de investigación.

Resumen

El presente estudio analiza el comportamiento hidráulico y sedimentario del río Chalhuanca mediante herramientas informáticas, con el objetivo de identificar zonas críticas de desborde, velocidades elevadas y acumulación de sedimentos. Este análisis responde a los impactos generados por eventos climáticos extremos, afectando la infraestructura y comunidades cercanas.

Para la modelación, se recopilaron datos hidrológicos y topográficos clave, como caudales máximos, coeficientes de Manning y levantamientos geoespaciales. Se emplearon los softwares HEC-RAS e IBER, logrando representar con precisión las condiciones actuales del río. Los resultados evidenciaron que en sectores como Pairaca y Chalhuanca, el río excede su capacidad hidráulica durante eventos extremos, generando erosión en márgenes y afectando infraestructuras cercanas. En particular, la simulación sedimentaria identificó socavación en la progresiva 5+040 y sedimentación en la progresiva 5+199, comprometiendo la estabilidad del cauce y aumentando el riesgo de desbordes. Ante estos hallazgos, se recomienda diseñar un plan integral de manejo del río, incluyendo la implementación de defensas ribereñas en los tramos críticos, dragados periódicos en zonas de acumulación y estabilización de márgenes mediante estructuras de protección y revegetación. Además, es necesario actualizar periódicamente los datos topográficos, hidrológicos y geomorfológicos del río para garantizar la precisión de futuras modelaciones. También se sugiere monitorear las velocidades del flujo en las zonas más expuestas a la erosión y diseñar medidas específicas para su mitigación.

Palabras claves: Modelación hidráulica, Sedimentación, HEC-RAS, Erosión, Inundación.

Abstract

This study analyses the hydraulic and sedimentary behaviour of the Chalhuanca River using computer tools, with the aim of identifying critical areas of overflow, high velocities and sediment accumulation. This analysis responds to the impacts generated by extreme climatic events, affecting infrastructure and nearby communities.

For the modelling, key hydrological and topographic data were collected, such as maximum flows, Manning coefficients and geospatial surveys. HEC-RAS and IBER software were used, achieving an accurate representation of the current conditions of the river. The results showed that in sectors such as Pairaca and Chalhuanca, the river exceeds its hydraulic capacity during extreme events, generating erosion on banks and affecting nearby infrastructure. In particular, the sedimentary simulation identified scour in the 5+040 channel and sedimentation in the 5+199 channel, compromising the stability of the channel and increasing the risk of overflows. Given these findings, it is recommended to design a comprehensive river management plan, including the implementation of riparian defenses in critical sections, periodic dredging in accumulation zones and margin stabilization through protection structures and revegetation. In addition, it is necessary to periodically update the topographic, hydrological and geomorphological data of the river to ensure the accuracy of future modeling. It is also suggested to monitor flow velocities in the areas most exposed to erosion and design specific measures for their mitigation.

Keywords: Hydraulic modeling, Sedimentation, HEC-RAS, Erosion, Flood.

Índice general

Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud.....	iii
Metadatos.....	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos.....	vi
Resumen	vii
Abstract.....	viii
Índice general.....	ix
Índice de tablas	xi
Índice de figuras.....	xii
Índice de Anexos.....	xiv
I. Introducción.....	15
II. Planteamiento del problema	17
2.1 Descripción y formulación del problema.....	17
2.2 Objetivos	19
2.2.1 Objetivo general	19
2.2.2 Objetivos específicos	20
2.3 Justificación e importancia	20
2.4 Hipótesis	22
2.5 Variables.....	23
III. Marco Teórico	25

3.1 Antecedentes de investigación	25
3.2 Bases teóricas	32
3.3 Definición de términos	44
IV. Metodología	50
4.1 Tipo y nivel de investigación	50
4.2 Ámbito temporal y espacial	51
4.3 Población y muestra.....	52
4.4 instrumentos	53
4.5 Procedimientos	54
4.6 Análisis de datos.....	55
4.7 Consideraciones éticas.....	56
V. Resultados y discusión	57
VI. Conclusiones.....	102
VII. Recomendaciones	103
VIII. Referencias	104
IX. Anexos	111

Índice de tablas

Tabla 1	Tabla de operacionalización de variables	24
Tabla 2	Caudales máximos de diseño	58
Tabla 3	Hidrograma de caudales para el río Chalhuanca para un T=100 años	59
Tabla 4	Coefficiente de manning	63
Tabla 5	Asignación de condiciones de contorno	64
Tabla 6	Coefficiente de manning	67
Tabla 7	Asignación de condiciones de contorno	68
Tabla 8	Asignación de condiciones de contorno en HEC-RAS	73
Tabla 9	Coefficiente de manning	74
Tabla 10	Ubicación de calicatas.....	78
Tabla 11	Resumen de análisis granulométrico (% retenido acumulado)	79
Tabla 12	Resumen de análisis granulométrico	84
Tabla 13	Coefficientes de manning asignados por tipo de suelo	94

Índice de figuras

Figura 1	Hidrograma de caudales para el río Chalhuanca para un T=100 años	60
Figura 2	Esquema hidráulico	61
Figura 3	Modelos de elevación digital del área en estudio	62
Figura 4	Modelos de elevación digital del área en estudio	62
Figura 5	Asignación de coeficiente de manning.....	64
Figura 6	Esquema hidráulico	66
Figura 7	Construcción de la malla en IBER.....	67
Figura 8	Simulación hidráulica resultado del IBER – situación actual.....	69
Figura 9	Mapa de inundación de todo el proyecto.....	69
Figura 10	Mapa de velocidades en el ámbito del proyecto.....	70
Figura 11	Vista en 2D del río Chalhuanca – tirante de agua	71
Figura 12	Construcción de la geometría en HEC-RAS	73
Figura 13	Simulación hidráulica resultado del HEC-RAS – situación actual	75
Figura 14	Mapa de velocidades en el ámbito del área de estudio	76
Figura 15	Vista en 2D del río Chalhuanca – tirante de agua	76
Figura 16	Mapa de ubicación de calicatas	80
Figura 17	Graduación granulométrica para la calicata N°01	81
Figura 18	Condiciones de contorno para la simulación.....	85
Figura 19	Tiempo de simulación.....	86
Figura 20	Reporte del volumen acumulado de sedimentos	86
Figura 21	Sección 5+040 – socavación detectada.....	87
Figura 22	Sección 5+199 – agradación de sedimentos.....	88
Figura 23	Simulación hidráulica resultado del HEC-RAS – situación actual	91
Figura 24	Simulación hidráulica resultado del IBER – situación actual	92

Figura 25	Mapa de inundación de toda el área de estudio.....	92
Figura 26	Mapa de velocidades en el ámbito del área de estudio	93
Figura 27	Vista en 2D del río Chalhuanca – tirante de agua	94
Figura 28	Sección 5+040 – socavación detectada.....	97
Figura 29	Sección 5+199 – agradación de sedimentos.....	98
Figura 30	Reporte del volumen acumulado de sedimentos	99

Índice de Anexos

Anexo 1 Matriz de consistencia	112
Anexo 2 Operacionalización de variables.....	113
Anexo 3 Panel fotográfico	114

I. Introducción

La modelación hidro-sedimentológica se usa para anticipar crecidas, evaluar socavación y estimar balances de sedimentos en ríos; herramientas como HEC-RAS 1D/2D integran ecuaciones hidrodinámicas y módulos de transporte/deposición para mapear zonas de erosión-deposición y probar medidas de encauzamiento y defensa ribereña, lo que la convierte en un estándar técnico en proyectos fluviales. (U.S. Army Corps of Engineers [USACE], 2023).

El Perú impulsa la gestión integrada por cuencas; para la cuenca interregional Pampas (que abarca ámbitos de Apurímac) la Autoridad Nacional del Agua aprobó el Plan de Gestión de Recursos Hídricos, que ordena acciones para oferta-demanda, calidad, y reducción del riesgo por inundaciones y erosión, demandando información hidrológica y modelación hidráulica para sustentar decisiones públicas. (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2022).

El agua, recurso vital para la vida y motor principal del desarrollo en las comunidades altoandinas, ha enfrentado desafíos constantes debido a su disponibilidad limitada y distribución desigual. En la región de Apurímac, el río Chalhuanca es uno de los principales afluentes que sostiene la actividad agrícola, económica y social de la población local. Sin embargo, la dinámica natural del río, caracterizada por procesos de sedimentación y erosión, ha generado problemas que afectan tanto la calidad como la cantidad del recurso hídrico disponible, repercutiendo directamente en la sostenibilidad de los sistemas de riego y la productividad agrícola. La sedimentación es un fenómeno complejo que reduce la capacidad de almacenamiento de los reservorios, disminuye la eficiencia de los canales de conducción y acelera el deterioro de la infraestructura hidráulica. Por otro lado, el cambio climático y las variaciones estacionales han intensificado estos procesos, dificultando la gestión adecuada de los recursos hídricos. Frente a este panorama, es fundamental el uso de herramientas informáticas para modelar el comportamiento hidráulico del río Chalhuanca y

analizar los patrones de sedimentación, permitiendo una planificación técnica y precisa que garantice la optimización del recurso hídrico. En este contexto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal la modelación hidráulica y de sedimentación del río Chalhuanca, utilizando herramientas informáticas avanzadas como HEC-RAS. El estudio no solo contribuirá al mejoramiento de la infraestructura hídrica y a la eficiencia en el manejo del agua en la región, sino que también establecerá una base técnica que puede ser replicada en otros proyectos similares en Apurímac y otras regiones altoandinas

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

La inestabilidad morfológica de ríos por crecidas y cambios en el régimen de sedimentos obliga a cuantificar velocidades, esfuerzos cortantes, tasas de transporte y cambios de lecho para ubicar zonas de erosión–deposición y sustentar defensas ribereñas. La práctica estándar es modelar con herramientas como HEC-RAS 1D/2D con módulo de sedimentos, que resuelve el flujo y calcula transporte y evolución del fondo, permitiendo comparar alternativas de encauzamiento y manejo de carga sólida. (USACE, 2023).

En el Perú, la Autoridad Nacional del Agua aprobó el Plan de Gestión de Recursos Hídricos de la cuenca interregional Pampas (que comprende ámbitos de Apurímac), priorizando la reducción del riesgo por inundaciones y erosión y la gestión de sedimentos con respaldo técnico. Esto demanda estudios hidro-sedimentológicos que integren hidrología, topografía/batimetría y modelación hidráulica para diseñar medidas efectivas y optimizar inversiones públicas en riberas y puentes. (ANA, 2022).

El río Chalhuanca se encuentra en la región de Apurímac, Perú, y es un afluente indirecto del río Apurímac. La cuenca del río Chalhuanca abarca diversas localidades, incluyendo el anexo Jayo en el distrito de Chalhuanca, provincia de Aymaraes.

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), en el distrito de Chalhuanca, la temperatura varía entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ a lo largo del año. La temporada de lluvias se extiende aproximadamente desde el 21 de septiembre hasta el 26 de abril, con un pico de precipitación en enero, alcanzando un promedio de 96 mm.

Entre las problemáticas se puede identificar como Erosión y sedimentación, La deforestación y las prácticas agrícolas inadecuadas en las zonas altas de la cuenca han incrementado la erosión del suelo, resultando en una mayor carga de sedimentos

transportados por el río. Esta sedimentación afecta la calidad del agua y reduce la capacidad del cauce, incrementando el riesgo de desbordes durante eventos de crecidas.

Contaminación por metales pesados, Estudios realizados en el río Chalhuanca han detectado la presencia de metales pesados como cadmio y plomo en los sedimentos y en especies acuáticas, lo que representa un riesgo para la salud humana y los ecosistemas locales.

Riesgo de inundaciones, La acumulación de sedimentos en el cauce disminuye su capacidad hidráulica, aumentando la probabilidad de inundaciones en áreas adyacentes durante temporadas de lluvias intensas. La falta de infraestructura adecuada para el encauzamiento y control de flujos contribuye a esta vulnerabilidad.

Falta de herramientas de gestión y predicción, Actualmente, no se cuenta con modelos hidráulicos y de sedimentación específicos para el río Chalhuanca que permitan predecir su comportamiento ante diferentes escenarios hidrológicos. Esta carencia dificulta la planificación y ejecución de medidas de mitigación efectivas.

Relevancia del estudio, La implementación de herramientas informáticas avanzadas, como modelos hidráulicos y de transporte de sedimentos, es esencial para:

- Simular y predecir el comportamiento del río bajo diversas condiciones hidrológicas.
- Identificar zonas críticas de erosión y deposición de sedimentos.
- Diseñar estrategias de mitigación para reducir riesgos de inundación y contaminación.
- Optimizar el manejo integrado de la cuenca, promoviendo prácticas sostenibles y la protección de los recursos hídricos.

Antecedentes, El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ha realizado evaluaciones de peligros geológicos en el anexo Jayo, distrito de Chalhuanca,

identificando riesgos asociados a movimientos en masa que afectan terrenos de pastoreo y cultivos, y que podrían impactar las viviendas asentadas aguas abajo.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) proporciona datos hidrológicos a través de la Plataforma Hidrológica Phisis, que pueden ser utilizados para alimentar y calibrar modelos hidráulicos en la cuenca del río Chalhuanca.

2.1.1 Problema general

¿Cómo Realizar una modelación hidráulica y sedimentación mediante herramientas informáticas para identificar puntos críticos de desborde, erosión y acumulación de sedimentos del río Chalhuanca, 2024?

2.1.2 Problemas específicos

a. ¿Cómo Identificar las características hidrológicas, topográficas y sedimentarias necesarias para la modelación hidráulica y sedimentaria del río Chalhuanca- 2024?

b. ¿Cómo simular el comportamiento hidráulico mediante el software HEC-RAS evaluando el impacto de caudales máximos y sus efectos en zonas críticas de inundación del río Chalhuanca, 2024?

c. ¿Cómo modelar el transporte de sedimentos mediante el software HEC-RAS identificando zonas de erosión, acumulación y cambios en la geometría del río Chalhuanca, 2024?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Realizar una modelación hidráulica y sedimentación mediante herramientas informáticas para identificar puntos críticos de desborde, erosión y acumulación de sedimentos del río Chalhuanca, 2024.

2.2.2 *Objetivos específicos*

a. Identificar las características hidrológicas, topográficas y sedimentarias necesarias para la modelación hidráulica y sedimentaria del río Chalhuanca- 2024.

b. simular el comportamiento hidráulico mediante el software HEC-RAS evaluando el impacto de caudales máximos y sus efectos en zonas críticas de inundación del río chalhuanca, 2024.

c. modelar el transporte de sedimentos mediante el software HEC-RAS identificando zonas de erosión, acumulación y cambios en la geometría del río chalhuanca, 2024.

2.3 Justificación e importancia

2.3.1 *Justificación*

El río Chalhuanca, ubicado en la región de Apurímac, desempeña un papel fundamental en el abastecimiento de agua para actividades agrícolas y económicas de las comunidades locales. Sin embargo, enfrenta serias problemáticas relacionadas con la sedimentación y la ineficiencia en su sistema de conducción, lo que compromete la disponibilidad y calidad del recurso hídrico. Actualmente, la infraestructura hidráulica asociada al río presenta deficiencias significativas, con sistemas rudimentarios de conducción que carecen de un diseño técnico adecuado para optimizar el transporte de agua y mitigar las pérdidas por sedimentación, erosión y filtración, estimadas en más del 35%.

El régimen hidrológico del río Chalhuanca está marcado por una alta variabilidad estacional, con caudales mínimos en época de estiaje y máximos durante la temporada de lluvias. Esta fluctuación, sumada a los procesos de sedimentación, afecta directamente la capacidad de conducción y almacenamiento del recurso hídrico, generando problemas de abastecimiento en las áreas agrícolas. Como resultado, una porción significativa de las hectáreas cultivables no recibe un riego adecuado, lo que reduce los rendimientos de cultivos

clave como el maíz y la papa, elementos esenciales para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico local.

El impacto de la sedimentación en el río Chalhuanca se refleja no solo en la pérdida de eficiencia de las estructuras hidráulicas, sino también en el deterioro de las condiciones agroclimáticas necesarias para el desarrollo agrícola sostenible. A pesar de los esfuerzos locales, como la limpieza de canales y el mantenimiento básico de la infraestructura existente, estas medidas resultan insuficientes frente a la magnitud del problema y la complejidad de las dinámicas sedimentarias.

En este contexto, se plantea la necesidad de realizar un estudio integral que permita modelar, mediante herramientas informáticas avanzadas, el comportamiento hidráulico y los patrones de sedimentación del río Chalhuanca. Este análisis técnico servirá como base para identificar zonas críticas, proponer soluciones específicas y optimizar la eficiencia en la conducción del recurso hídrico. La implementación de estas medidas contribuirá no solo a reducir las pérdidas de agua y mejorar la disponibilidad del recurso, sino también a incrementar la productividad agrícola y garantizar el desarrollo socioeconómico sostenible de las comunidades dependientes del río.

El presente estudio tiene como objetivo principal diseñar estrategias técnicas fundamentadas en modelos hidráulicos y sedimentológicos que permitan una gestión eficiente del agua en el río Chalhuanca. Asimismo, se espera que esta investigación sirva como referencia para la planificación de futuras intervenciones en infraestructura hidráulica en la región de Apurímac, promoviendo el uso racional del recurso hídrico y fortaleciendo la resiliencia de las comunidades rurales frente a los desafíos climáticos y ambientales.

La modelación hidráulica y sedimentación mediante herramientas informáticas como HEC-RAS permite analizar y predecir el comportamiento de los ríos bajo diferentes condiciones hidrológicas. Estas herramientas se fundamentan en teorías de mecánica de

fluidos, transporte de sedimentos y dinámica fluvial, las cuales proporcionan un marco científico para comprender fenómenos complejos como la erosión, sedimentación y capacidad de transporte del flujo. Además, la aplicación de estas metodologías contribuye a la gestión eficiente de los recursos hídricos, optimización de infraestructura hidráulica y mitigación de riesgos ambientales, asegurando un manejo sostenible de la cuenca del río Chalhuanca.

La justificación metodológica de este estudio radica en la aplicación de herramientas informáticas avanzadas como HEC-RAS para la modelación hidráulica y de sedimentación en el río Chalhuanca. Este enfoque permite un análisis preciso y detallado de los procesos fluviales, basándose en principios de mecánica de fluidos y transporte de sedimentos. La metodología propuesta incluye la recopilación y análisis de datos hidrológicos y geomorfológicos, que serán integrados en el software para generar simulaciones realistas del comportamiento del río bajo diferentes escenarios.

2.3.2 Importancia

El uso de HEC-RAS no solo facilita la comprensión de las dinámicas fluviales, sino que también permite identificar zonas de riesgo, optimizar el diseño de infraestructuras hidráulicas y proponer soluciones basadas en evidencia científica. Este enfoque metodológico garantiza la reproducibilidad, exactitud y aplicabilidad de los resultados, contribuyendo de manera significativa al manejo sostenible de la cuenca y a la mitigación de los impactos ambientales.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

La modelación hidráulica y sedimentación mediante herramientas informáticas permitirá identificar puntos críticos de desborde, erosión y acumulación de sedimentos del río Chalhuanca, 2024.

2.4.2 Hipótesis Específicas

a. La identificación de las características hidrológicas, topográficas y sedimentarias necesarias para la modelación hidráulica y sedimentaria permitirá obtener datos precisos sobre el comportamiento del río Chalhuanca, 2024,

b. La simulación del comportamiento hidráulico mediante el software HEC-RAS permitirá evaluar el impacto de caudales máximos y determinar sus efectos en zonas críticas de inundación del río Chalhuanca, 2024,

c. La modelación del transporte de sedimentos mediante el software HEC-RAS permitirá identificar zonas de erosión, acumulación y cambios en la geometría del río Chalhuanca, 2024.

2.5 Variables

VARIABLE DEPENDIENTE

VD: Modelación hidráulica y sedimentación.

VARIABLE INDEPENDIENTE

VI: Herramientas informáticas.

Tabla 1

Tabla de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición	Índice	Instrumentos
Variable I: Herramientas informáticas.	Programa especializado que permiten simular flujo 1D/2D y procesos de transporte/deposición de sedimentos en ríos, con base en ecuaciones hidrodinámicas y módulos de sedimentos (USACE, 2023).	Uso de software como HEC-RAS para modelar dinámicas del río Chalhuanca.	•Tipo de software utilizado	•Software empleado	Razón	•m ³ /s	•Software HEC-RAS
			•Funcionalidades y precisión de datos aplicados	•Simulación de flujos hidráulicos y transporte de sedimentos	Razón	•m ³	
Variable D: Modelación hidráulica y sedimentos.	Representación numérica del flujo (niveles, velocidades) mediante ecuaciones de Saint-Venant y del transporte de sedimentos (erosión, carga y deposición) para describir el comportamiento morfológico del cauce (USACE, 2021).	Análisis de los parámetros hidráulicos y sedimentológicos simulados.	•Parámetros hidráulicos	•Caudales simulados	Razón	•m ³ /s	•Software Arc-Gis
			•Transporte de sedimentos	•Volumen de sedimentos transportados	Razón	•m ³	•Software IBER
			•Zonas críticas	•Localización de áreas de erosión y acumulación	Razón	•m	

Nota. La tabla organiza las variables del estudio, indicando definición conceptual/operacional, dimensiones e indicadores de medición.

Además, precisa la escala y los instrumentos usados para garantizar coherencia entre objetivos, medición y análisis.

III. Marco Teórico

3.1 Antecedentes de investigación

Yassine et al. (2023) en su artículo denominado “Modelado numérico de la evolución de un tramo fluvial con una morfología compleja para ayudar a definir futuras decisiones de restauración sostenible”. Plantearon como objetivo reconstruir con modelación numérica 2D la evolución morfológica posterior a una avenida y usar esa evidencia para definir medidas de restauración más sostenibles. La metodología fue de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, el procedimiento consistió en implementar un modelo hidromorfológico 2D en TELEMAC-MASCARET, calibrando la hidráulica con un caudal de 58.4 m³/s y ajustando la rugosidad (coeficiente de Strickler 20–60 m/s, con mejor ajuste alrededor de $K = 30$), logrando errores de nivel de agua que no superaron 20 cm y un RMSE ≈ 0.31 . En resultados documentaron que el tramo venía afectado por extracciones históricas del orden de 4×10^6 m³, asociadas a una incisión del lecho de >3 m, y simularon eventos con referencia de magnitudes, una crecida de 742 m³/s (asociada a $T=100$ años) y la avenida 2018 con pico de ~ 332 m³/s (asociada a $T=10$ años), estimando para 2018 un volumen de depósito del orden de 81,220 m³ y fracciones de carga de fondo entre 8% y 16%. Concluyeron que, aunque replicar la localización exacta de canales trenzados es difícil, el modelo sí entregó predicciones volumétricas confiables útiles para decidir intervenciones y evaluar el efecto de estructuras como los azudes.

Hawez et al. (2025) en su artículo “Simulación de la dinámica de sedimentos en una gran llanura aluvial del río Danubio”. Tuvo como objetivo de cuantificar, mediante simulación, cómo se distribuyen el flujo y los sedimentos durante crecidas y qué implicancias tiene eso para la restauración/gestión de la llanura. La metodología se basó en un modelo 2D (HEC-RAS) con calibración/validación hidrodinámica usando caudales y niveles observados (p. ej., estación Baja) y contraste de desempeño en secciones y ramales;

además, incorporaron calibración con concentración de sedimentos en suspensión (SSC). En resultados reportaron un tramo modelado de 60 km, con un régimen del Danubio de caudal medio 2300 m³/s y picos que pueden superar 8000 m³/s; en una validación de pico, el observado fue 6729.46 m³/s frente a 6722.36 m³/s simulado (error aproximado -0.1%), y en un brazo lateral se contrastó 52.2 m³/s observado vs 51.5 m³/s simulado (diferencia -1.3%). En sedimentos, usaron valores máximos de SSC en torno a 231 mg/L (en torno a 8000 m³/s) y mostraron gradientes espaciales 300 mg/L aguas arriba y valores menores hacia aguas abajo. Concluyeron que el enfoque 2D permite capturar con buen ajuste la partición de caudales y el patrón de transporte/deposición, aportando una base técnica para decisiones en llanuras de inundación.

Azmeri et al. (2025) en su artículo “Abordaje de problemas de sedimentación: Modelado de la curva de sedimentación y el transporte de sedimentos fluviales mediante la aplicación HEC-RAS 6.1”. Tuvo como objetivo de construir una curva de gasto sólido (rating curve) y un modelo de transporte que sirva para gestionar tramos críticos. La metodología integró mediciones de carga de fondo con grab sampler, carga en suspensión con botellas de 1 dm³, aforos con currentmeter, geometría/rugosidad y caudales de diseño, y luego modelación de transporte en HEC-RAS 6.1. Como resultados, presentaron ecuaciones de regresión tipo rating curve para tres zonas (aguas arriba, media y abajo), $Q_s = 0.0707 \cdot Q_w^2 + 109.72 \cdot Q_w$ (aguas arriba), con coeficientes de determinación $R^2 = 0.9761-0.9796$, lo cual indica ajuste muy alto. En la respuesta morfológica reportaron cambios de lecho con degradación y agradación diferenciadas, destacando valores como -0.365 m (degradación) en una sección y +1.655 m (agradación) en otra, además de máximos del orden de +2.08 m (agradación) y -0.482 m (degradación) en secciones específicas. Concluyeron que la combinación de curva Q_s-Q_w y simulación permite localizar zonas de riesgo por pérdida de capacidad hidráulica y sustentar medidas para reducir inundaciones recurrentes.

Martin et al. (2025) en su artículo denominado “Restricciones al transporte de sedimentos para la restauración del Delta del Ebro”. El objetivo fue estimar cuánta capacidad real tiene el sistema para movilizar sedimentos bajo condiciones actuales y futuras (clave para el manejo del delta). La metodología combinó simulación hidrodinámica y el desarrollo de una relación tipo curva (rating) para inferir transporte bajo distintos escenarios, enlazando información histórica con condiciones recientes y proyecciones. En resultados, documentaron una caída fuerte del transporte potencial respecto al periodo histórico: desde valores del orden de 28.1 millones de toneladas/año finales del siglo XIX a una capacidad actual estimada de ~9 millones de toneladas/año, equivalente a una reducción de aproximadamente 67%, atribuida principalmente a regulación y extracciones; además, proyectaron reducciones adicionales del orden de ~30% hacia 2060 y ~50% hacia 2100. Concluyeron que cualquier estrategia de restauración/gestión sedimentaria en el Ebro debe asumir restricciones reales de capacidad de transporte y priorizar medidas compatibles con ese “techo” hidráulico-sedimentológico

Contreras (2024) en su tesis titulada “Simulación hidráulica del transporte de sedimentos en obra de control de inundaciones en el río Motupe”. El objetivo fue evaluar, mediante herramientas informáticas, el comportamiento hidráulico y el transporte de sedimentos asociado a una obra de control de inundaciones. La metodología utilizada fue de simulación numérica, empleando modelación hidrológica para obtener el caudal de diseño y modelación hidráulica bidimensional para representar el flujo y su interacción con la obra. Donde el resultado fue que, para un evento con periodo de retorno de 25 años, la estructura de control derivó 417.5 m³/s de un caudal total de 905.8 m³/s, reportando una reducción del 14% asociada al control hidráulico planteado. Concluye que el uso combinado de modelos permite cuantificar el desempeño hidráulico de la obra y sustentar decisiones de diseño/ajuste considerando condiciones de avenida y dinámica de sedimentos.

Terrones (2024) en su tesis titulada “Estimación del gasto sólido de fondo y volumen de sedimentos acumulado en el cauce de la quebrada Calispuquio aguas arriba de la canalización del Jr. Nicolás Arriola, Cajamarca, 2024”. El objetivo fue estimar el gasto sólido de fondo y el volumen de sedimentos acumulado que favorece la colmatación aguas arriba de una canalización urbana. La metodología utilizada fue monitoreo en campo (trampa de sedimentos y fotogrametría) y contraste con métodos empíricos; el periodo de análisis se enfocó en la temporada lluviosa noviembre 2023–mayo 2024. Donde el resultado fue que el área crítica analizada fue 171 m² y se calculó un volumen acumulado de 18.97 m³ dentro del canal; además, en una trampa se midió 1.9 m³ de sedimento, y se reportaron precipitaciones de apoyo entre 0.2 y 5.7 mm (evento de 5.7 mm en 2 h). Concluye que la cuantificación volumétrica y del transporte (con medición y fórmulas) permite sustentar acciones de mantenimiento y control de sedimentos en puntos de estrangulamiento del cauce.

Martel (2023) en su tesis titulada “Desarrollo de un modelo hidrodinámico bidimensional para la predicción de inundaciones fluviales en la ciudad de Tumbes – 2023”. El objetivo fue implementar un modelo 2D para pronosticar la propagación de inundaciones y sus parámetros hidráulicos en un entorno urbano. La metodología utilizada fue modelación hidrodinámica bidimensional, con proceso de calibración/validación frente a condiciones observadas y evaluación del comportamiento del flujo para eventos extremos. Donde el resultado fue que los caudales del modelo hidrológico para avenida centenaria superan 6000 m³/s, y en la calibración se reportaron errores aproximados de 2.57% en velocidades y 8.31% en tirantes; el ámbito de representación alcanzó aproximadamente 4.5 km² asociados al corredor fluvial urbano. Concluye que el modelo 2D es útil para delimitar zonas críticas de inundación y respaldar medidas de gestión del riesgo (alerta, defensas, control de ocupación de fajas marginales).

Pizarro (2022) en su tesis titulada “Estudio hidrológico e hidráulico para el dimensionamiento optimizado del puente vehicular sobre la quebrada El Choclino...” (San Martín). El objetivo fue determinar el caudal de diseño y optimizar el dimensionamiento hidráulico del puente, considerando estabilidad del cauce y seguridad ante avenida. La metodología utilizada fue aplicada y descriptiva, con estimación hidrológica mediante métodos empíricos (p. ej., Iszkowski, Creager, CN y racional) y evaluación hidráulica para compatibilizar luz, niveles de agua y condiciones de socavación. Donde el resultado fue que se definió una luz de referencia $L = 12.00$ m para el puente proyectado y, para el análisis de socavación general, se estableció como criterio usar un periodo de retorno de 500 años (según recomendación normativa usada en el documento). Concluye que el dimensionamiento no debe basarse solo en caudal y tirante, sino también en la socavación potencial para fijar niveles mínimos de cimentación y obras de protección.

Muñoz y Hernández (2023) en su trabajo denominado “Análisis hidrodinámico comparativo de inundaciones basados en modelos Hec-Ras e Iber en el distrito Reque, cuenca río Chancay, departamento de Lambayeque”. El objetivo fue comparar la simulación de inundaciones con HEC-RAS e IBER para delimitar la mancha de inundación y evaluar diferencias de comportamiento hidráulico. La metodología utilizada fue aplicada, con modelación hidrodinámica en un tramo de 4 km, empleando como condición de avenida un caudal de $Q = 1290$ m³/s y analizando variables como tirantes, velocidades, caudal específico y extensión de la inundación. Donde el resultado fue que se obtuvieron tirantes máximos cercanos a 8.59 m en el cauce y alturas de inundación sobre áreas agrícolas entre 1.5 m y 0.1 m; además, en IBER se reportó una velocidad máxima de 7.50 m/s y un caudal específico máximo de 14.55 m²/s, observándose diferencias en el tramo final, donde HEC-RAS estimó mayor área inundada; también se indicó que la simulación no debía ser menor a 7000 s para mejorar la precisión. Concluye que ambos modelos permiten caracterizar inundaciones con

resultados comparables, pero la selección y configuración del software puede influir en la extensión estimada, por lo que la calibración y el tiempo de simulación son determinantes.

Núñez (2021), en su tesis denominada “Modelo hidráulico de transportes de sedimentos e influencia de los parámetros fluviales, en la confluencia de los ríos Tarma y Tulumayo”. El objetivo fue modelar hidráulica y morfológicamente la confluencia de los ríos Tarma y Tulumayo (río Chanchamayo) para evaluar cómo el transporte de sedimentos y parámetros fluviales condicionan erosión y sedimentación del lecho. La metodología utilizada fue cuantitativa, con simulación 2D en IBER incorporando geometría (MDE), rugosidad de Manning, caudales aforados y calibración con mediciones de ADCP (tirante, velocidad, área hidráulica y espejo de agua); para el transporte sólido se consideró principalmente carga de fondo usando Meyer-Peter y Müller, con escenarios de $T = 50$ y 100 años, en una longitud total analizada de 6.75 km (Tarma 3.4 km y Tulumayo 3.35 km). Donde el resultado fue que, para el escenario de $T = 100$ años, se usaron caudales máximos de entrada de 478.70 m³/s (Tarma) y 1140.80 m³/s (Tulumayo), y se estimaron cambios morfológicos máximos del orden de 2.50 m (erosión) y 3.04 m (sedimentación), identificando sectores con mayor susceptibilidad a degradación y colmatación. Concluye que el uso de un modelo 2D con módulo morfológico permitió localizar zonas críticas y cuantificar magnitudes de cambio del lecho bajo avenidas extremas, aportando base técnica para medidas de control y gestión del cauce.

Davila (2024) desarrolló la tesis “Diseño de canal de riego con máxima eficiencia hidráulica mediante el software Hec-Ras, del tramo Km 0+000 al Km 2+120, del sector Mariño región Apurímac – 2023”. El objetivo fue evaluar cómo el uso de HEC-RAS ayuda a lograr una condición de máxima eficiencia hidráulica en un tramo de 2.120 km, probando tres alternativas de pendiente y revisando variables hidráulicas (línea de energía, tirante normal/crítico, saltos y remansos). La metodología se planteó como aplicada, cuantitativa y

descriptiva, con verificación de parámetros por tramos. Los resultados reportaron un caudal real de $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$ frente a un caudal calculado de $0.192 \text{ m}^3/\text{s}$ y, para una pendiente de 2.50%, tirantes representativos del orden de 0.43 m (normal) y 0.35 m (crítico), con velocidades que llegaron a $\sim 1.27 \text{ m/s}$ (según la alternativa evaluada). Concluye que la simulación con HEC-RAS permite comparar opciones y seleccionar el desempeño hidráulico más conveniente, contrastando el diseño con software de canales.

Yucra (2023) en su tesis “Evaluación de riesgo por flujo de detritos y modelamiento hidrológico de la quebrada Sahuanay en el distrito de Tamburco, Abancay, 2022” planteó como objetivo determinar niveles de riesgo ante flujos con alta carga sólida asociados a lluvias intensas (mencionadas para diciembre–abril). La metodología combinó modelación hidrológica con HEC-HMS v4.10 (para caudal) y simulación hidráulica con HEC-RAS 6.1 usando el método de O’Brien, además de análisis de vulnerabilidad y clasificación de riesgo. Los resultados consignan un caudal máximo de $24.30 \text{ m}^3/\text{s}$, velocidades máximas de hasta 8 m/s y umbrales máximos de 1.5 m en la simulación; el producto final incluye mapas y categorización de predios en niveles (muy alto, alto, medio y bajo). Concluye que la modelación permite sustentar técnicamente la zonificación de riesgo y la priorización de medidas de reducción.

Tuñoque (2024) en la tesis “Riesgo cuantitativo por flujo de detritos desencadenados por precipitaciones pluviales en la microcuenca Sahuanay, Distrito de Tamburco – Abancay – Apurímac, 2023” tuvo como finalidad estimar el riesgo cuantitativo (pérdidas humanas y económicas) frente a escenarios de flujos de detritos inducidos por precipitaciones. La metodología se basó en empadronamiento y modelación/umbrales para escenarios con periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, incorporando curvas de daño y estimación de pérdidas. Los resultados reportan 1,360 viviendas y 3,401 personas expuestas; para 50, 100 y 500 años se estimaron pérdidas de vidas de 708, 741 y 748 respectivamente, y pérdidas

económicas de S/ 65,061,251.7, S/ 68,116,296.4 y S/ 73,275,803.9, calificando el riesgo como inaceptable. Concluye que, con esa magnitud de impacto, corresponde proponer y justificar medidas estructurales y no estructurales de reducción del riesgo.

Batallanos (2023) en “Análisis del comportamiento hidráulico del canal Sahuanay para la evacuación de flujo de detritos en el distrito de Tamburco, Abancay 2022” tuvo como objetivo verificar si el canal tiene capacidad hidráulica para evacuar eventos con alta concentración sólida. La metodología fue aplicada, descriptiva y no experimental, usando herramientas de modelado hidráulico y mediciones/campañas de campo (topografía, hidrología y geología), construyendo un modelo para simular el flujo de detritos y probar condiciones extremas. Los resultados reportan un tirante máximo de 5.88 m, velocidad de 7.33 m/s, concentración volumétrica de 51%, esfuerzo de cedencia de 42.77 Pa y viscosidad de 431.04 Pa·s, señalando que aun con diseño para condiciones extremas se evidencian limitaciones de evacuación en alta intensidad. Concluye que el canal requiere revisión de capacidad/seguridad hidráulica para escenarios severos de detritos.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Herramientas informáticas.

Las herramientas informáticas en el contexto de la ingeniería hidráulica y sedimentológica son sistemas de software diseñados para simular y analizar el comportamiento de cuerpos de agua y el transporte de sedimentos. Estas herramientas permiten modelar fenómenos complejos como flujos en ríos, inundaciones, erosiones y deposiciones de sedimentos, facilitando la planificación y gestión eficiente de recursos hídricos (Chow, Maidment, y Mays, 1988).

Su uso es esencial para predecir respuestas del sistema ante diferentes escenarios y para diseñar medidas de mitigación adecuadas. Además, ofrecen la posibilidad de realizar

simulaciones con datos reales y escenarios hipotéticos, proporcionando un marco confiable para la toma de decisiones basada en evidencia científica.

Clasificación de las Herramientas Informáticas

a) Herramientas de Simulación Hidraulica

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System):

- **Descripción:** Desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, HEC-RAS permite realizar análisis de flujo unidimensional y bidimensional en ríos y canales. Facilita la simulación de perfiles de flujo, evaluación de inundaciones y análisis de transporte de sedimentos (Brunner, 2021).
- **Aplicaciones:** Se utiliza para modelar comportamientos hidráulicos en cauces naturales y artificiales, evaluar riesgos de inundación y planificar obras hidráulicas. Su integración con datos geoespaciales mejora la precisión de las simulaciones.

b) Herramientas de Análisis Geoespacial

ArcGIS:

- **Descripción:** Un sistema de información geográfica (GIS) que permite analizar, gestionar y visualizar datos espaciales, como modelos digitales del terreno (MDT) y mapas de pendientes.
- **Aplicaciones:** Es fundamental para identificar zonas críticas en cuencas hidrográficas y optimizar el ingreso de datos en herramientas de modelación como HEC-RAS (Esri, 2020).

QGIS:

- **Descripción:** Alternativa de código abierto para el análisis geoespacial, con herramientas avanzadas para la visualización y gestión de datos geográficos.

- **Aplicaciones:** Integra funcionalidades para crear mapas temáticos y realizar análisis de distribución espacial de sedimentos.

3.2.1.1 Software empleado. Se emplea un paquete de modelación hidráulica–morfodinámica capaz de resolver flujo 1D/2D no permanente y acoplar el transporte de sedimentos y la evolución del lecho (p. ej., HEC-RAS 2D Sediment). Su alcance incluye mallas 2D, rugosidades espaciales, condiciones de borde temporales y cálculo de erosión/deposición por continuidad de sedimentos. (USACE, 2023).

Componentes y Funcionalidades Clave

- **Modelación Hidrodinámica:** Simulación de flujos de agua considerando variables como velocidad, profundidad y dirección del flujo.
- **Transporte de Sedimentos:** Análisis del movimiento de partículas sólidas dentro del flujo de agua, incluyendo procesos de erosión, transporte y deposición.
- **Integración con SIG:** La capacidad de interactuar con sistemas de información geográfica permite una representación espacial precisa de los resultados.

Ventajas de las Herramientas Informáticas

- **Precisión:** Permiten simulaciones basadas en modelos matemáticos validados, lo que asegura resultados detallados y confiables.
- **Escenarios Personalizados:** Facilitan la evaluación de escenarios hipotéticos, incluyendo condiciones climáticas extremas o cambios en el uso del suelo.
- **Eficiencia:** Reducen costos y tiempos en comparación con experimentos físicos tradicionales.

Limitaciones y Desafíos

- **Dependencia de datos:** La calidad de las simulaciones está directamente vinculada a la precisión de los datos de entrada.
- **Requerimientos Técnicos:** Su uso implica conocimientos especializados y recursos computacionales avanzados.

3.2.1.2 Simulación de flujos hidráulicos y transporte de sedimentos. Una simulación 2D de lecho móvil integra cuatro módulos interrelacionados: flujo hidráulico, transporte de sedimentos (carga de fondo/suspendida), dinámica del lecho y según el caso, procesos de margen; la solución numérica acoplada permite predecir niveles, velocidades y cambios morfológicos. (Lai, 2020).

3.2.2 modelación hidráulica y sedimentación

Diversos fenómenos naturales y del ámbito hidráulico son tan intrincados que solo los métodos matemáticos pueden desentrañar. Es prudente emplear métodos experimentales como maestra para encontrar soluciones efectivas en ingeniería, estuarios, ríos y obras hidráulicas en su totalidad. Los métodos matemáticos proponen respuestas con modelos idealizados, lo que facilitan reducciones significativas, las cuales desencadenan efectos que requieren evaluación experimental a través de modelos físicos a escala reducida o analógica. En el ámbito de la hidráulica, el concepto de modelo se refiere a un mecanismo que reemplaza un objeto tangible llamado prototipo, procesando datos específicos para ser utilizados en la creación y manejo de proyectos de ingeniería civil. Un modelo físico a escala reducido es una miniatura del objeto real o prototipo, y se rige por ciertos parámetros matemáticos establecidos. Que sus siglas en ingles significan Hydrologic Engineering Center's – River Analysis System, este programa calcula perfiles de flujo, bajo la hipótesis del flujo unidimensional; Los parámetros que componen el programa facilitan la estimación de trayectorias de flujo tanto a largo plazo como a corto, así como la evaluación de la pureza del agua. El HEC – RAS, bautizado en 1970 por el Centro de Ingeniería Hidrológica, del

Cuerpo de Ingenieros de la Armada estadounidense. (Cuerpo de Ingenieros del Ejército). El HEC – 2 ofrece la posibilidad de diseñar mapas de la superficie sumergida del agua, en un estado de flujo ininterrumpido en canales o ríos, basándose en la teoría del flujo unidimensional. La solución de la ecuación de la energía se realizaba utilizando el método del paso estándar. El modelo también ofrece la posibilidad de analizar cómo los perfiles acuáticos se transforman bajo la influencia de puentes y alcantarillas. Una de las barreras del HEC – 2 radicaba en su capacidad para diseñar perfiles para flujos subcríticos o supercríticos.

3.2.2.1 Caudales simulados. Son series temporales (hidrogramas) usadas como condiciones de frontera para forzar el modelo—usualmente aguas arriba—y representan el caudal de diseño o de evento que ingresa al dominio numérico; pueden cargarse desde HEC-DSS o ingresarse en tablas. (USACE, s. f.).

3.2.2.2 Volumen de sedimentos transportados. Es la cuantificación integrada del transporte (carga total) a través de una sección o área y en un intervalo de tiempo, derivada del gasto sólido instantáneo que resulta de que el esfuerzo cortante supere el umbral de arranque; se relaciona con la continuidad morfológica del lecho. (García, 2008).

3.2.2.3 Localización de áreas de erosión y acumulación. Se identifican a partir de los mapas de cambio de cota del lecho (Δz): valores negativos indican erosión y positivos deposición; su patrón espacial depende de la hidrodinámica, la granulometría (arena-limo/arcilla) y las formulaciones de mezcla cohesiva/no cohesiva implementadas en el modelo. (Deltares, 2020).

3.2.2.4 Estructura de datos para realizar un modelamiento hidráulico con HEC – RAS. Para llevar a cabo un análisis hidráulico con el software HEC – RAS, es necesario seguir una secuencia de etapas que generarán los archivos que detallarán tanto la forma como las condiciones de borde del sistema. En términos generales, los pasos fundamentales son:

- Crear un nuevo proyecto.
- Ingresar datos geométricos.
- Ingresar datos del flujo y condiciones de borde.
- Ejecutar cálculos hidráulicos.
- Ver y analizar los resultados.

3.2.2.5 Definición de Modelación Hidráulica y de Sedimentos. La modelación hidráulica se refiere al uso de modelos matemáticos y computacionales para simular el comportamiento del flujo de agua en sistemas naturales o construidos, como ríos, canales y embalses. Por su parte, la modelación de sedimentos implica la simulación del transporte, deposición y erosión de partículas sólidas dentro de estos cuerpos de agua. Estas herramientas permiten analizar y predecir fenómenos hidráulicos y sedimentológicos bajo diversas condiciones, facilitando el diseño y la gestión eficiente de infraestructuras relacionadas con el agua.

3.2.2.6 Importancia de la Modelación Hidráulica y de Sedimentos. Diseño de Infraestructuras Hidráulicas: La modelación permite predecir cómo las estructuras interactuarán con el flujo de agua y el transporte de sedimentos, optimizando su diseño y funcionalidad.

- **Gestión de Inundaciones:** Mediante la simulación de diferentes escenarios de flujo, es posible identificar áreas susceptibles a inundaciones y planificar medidas de mitigación adecuadas.
- **Conservación Ambiental:** La modelación ayuda a comprender los procesos de erosión y sedimentación, fundamentales para la preservación de ecosistemas acuáticos y la calidad del agua.

3.2.2.7 Efecto antrópico en el tránsito de sedimentos. Es crucial comprender que los patrones de flujo de sedimentos se moldean tanto por la madre naturaleza como por la

mano humana. Es sabido que las tasas de erosión pueden dispararse selectivamente debido a la acción de cultivos y otras actividades agrícolas. Estos fenómenos han incrementado la acumulación de sedimentos en los ríos, la presencia de sedimentos por efecto de la actividad humana se ha multiplicado de cinco a diez veces y ha sido ampliamente documentada. Se ha identificado también que este incremento en la producción de sedimentos está relacionado con el crecimiento población en las áreas de análisis.

En base a estos estudios, se ha calculado que la extracción de sedimentos en naciones en desarrollo ha experimentado un aumento de 1,6 veces más que la expansión demográfica. Además, es crucial tener en cuenta cómo la edificación de reservorios disminuye el flujo de sedimentos, capturando la mayoría de los sedimentos suspendidos que el río lleva consigo. De Walling y Webb, 1996. Esta acumulación de sedimentos puede desencadenar diversos efectos que requieren un análisis minucioso.

3.2.2.8 Relación de los sedimentos y los servicios ecosistémicos en presas. La gestión de los sedimentos debe abordarse de manera holística: desde su nacimiento en los ríos, pasando por los embalses y descendiendo hasta el océano, a través de estrategias interinstitucionales y sociales. No obstante, es innegable que las estrategias para frenar la acumulación de sedimentos en la cuenca exigen una inversión considerable y un impacto duradero. (Jiménez et al., 2005) Las aguas almacenadas en represas se emplean principalmente para producir electricidad, cultivar plantas y proveer agua para el consumo humano, y sus características pueden ser analizadas según su propósito. En el ámbito de la energía hidroeléctrica, el valor del agua puede ser medido por la fuerza hidráulica en relación con las turbinas o por fuentes de energía alternativas disponibles. Además, se puede considerar que esta agua retorna al río y no ha sido consumida, lo que le confiere un valor residual (Mccartney y sus colegas, 2001).

3.2.2.9 transporte y arrastre de sedimentos. Las mediciones sedimentológicas juegan un papel crucial en proyectos de ingeniería y en estudios que buscan profundizar en la intrincada danza del transporte de sedimentos.

Las mediciones del transporte de sedimentos, la granulometría del transporte y las características del sedimento del lecho son pilares fundamentales para los estudios hidráulicos. Se emplea para desentrañar el proceso de transporte y el equilibrio sólido en un tramo de río, así como para verificar modelos morfo dinámicos para calibrar diversas metodologías de medición. Basile, en su obra del 2018.

Cuando el esfuerzo de corte del lecho provocado por el flujo supera el umbral de movimiento, las partículas de sedimento que componen el lecho entran en danza. El viaje subterráneo de los sedimentos consiste en que las partículas de sedimento se deslizan, ruedan, o se desplazan en breves saltos, aunque pertenecen al movimiento cercano al fondo, donde pueden escapar de manera temporal.(Dey, 2014)

3.2.2.10 Clasificación de transporte y arrastre de sedimentos. Antes de presentar las ecuaciones que ilustran el tránsito de sedimentos, es crucial establecer algunas definiciones iniciales.

- **Transporte de fondo** El transporte de fondo está constituido por el sedimento que se mueve por arrastre, rodadura o saltación en un estrato cerca del lecho del río. El transporte de fondo y la velocidad del agua en proximidades del lecho varían considerablemente con respecto al espacio y al tiempo.
- **Transporte en suspensión** El transporte en suspensión está conformado por el transporte en la columna de agua del material del lecho y de la carga de lavado. El transporte en suspensión de sedimentos del lecho, es decir, originado a partir del material presente en el lecho, depende de las condiciones hidrodinámicas y de la composición granulométrica del mismo.

En este tipo de transporte, las partículas pierden contacto con el lecho y realizan trayectorias largas, comparables a la profundidad del flujo, sostenidas por las pulsaciones turbulentas de la corriente hídrica. El perfil de concentración de sedimentos en suspensión del material del lecho en la columna de agua no es uniforme. La concentración de sedimentos en suspensión disminuye a medida que uno se mueve desde el fondo a la superficie. La turbulencia produce la difusión de sedimento desde las zonas de alta concentración cerca del lecho hacia las zonas de baja concentración cerca de la superficie del agua.

- **Movimiento incipiente de sedimentos.** El equilibrio de una partícula, en el fondo de un río aluvial, es perturbado si la resultante de las fuerzas desestabilizadoras de arrastre y alzamiento hidrodinámico, son mayores que las fuerzas estabilizadoras que resisten el movimiento, tales como gravedad y cohesión. La cohesión es importante para limos y arcillas o arenas finas con diversos contenidos de limos y arcilla. Cuando el sedimento que compone el lecho es granular incoherente las partículas resisten el movimiento principalmente debido al peso sumergido. Las partículas granulares de sedimento no cohesivo se mueven como entidades simples. En cambio, cuando el material constitutivo del lecho es fino y contiene limo y arcillas, las fuerzas cohesivas predominan y son responsables de la resistencia a la erosión que exhiben tales materiales. En caso de ser movilizadas, las partículas de un lecho cohesivo se mueven generalmente formando un conjunto agregado de partículas. (Basile, 2018)

3.2.2.11 Transporte de sedimentos del lecho. El transporte de sedimentos del lecho puede ser dividido en transporte de fondo y transporte en suspensión. Los dos modos de

transporte de material del lecho tienen influencia en los procesos de erosión y sedimentación de ríos aluviales. Numerosas ecuaciones han sido propuestas para calcular el transporte de sedimentos en función de las características morfológicas, hidráulicas y sedimentológicas locales de los cursos de agua. La validez de estas es limitada al rango de variación de los parámetros hidrodinámicos y sedimentológicos para los cuales han sido verificadas. Generalmente, cuando se superan dichos límites, proporcionan valores de transporte notablemente distintos a los medidos. Las ecuaciones proporcionan el transporte de sedimentos en condiciones de equilibrio, es decir, en condiciones de flujo permanente y uniforme tanto para la corriente hídrica como para el sedimento. El transporte sólido en condiciones de equilibrio se denomina también capacidad de transporte, es decir, la cantidad de sedimentos del lecho que la corriente hídrica puede movilizar aguas abajo en función de los parámetros hidrodinámicos y sedimentológicos locales del río. (Basile, 2018).

3.2.2.12 Tipos de Modelos. Presentamos los siguientes modelos

- **Modelos Unidimensionales (1D):** Simulan el flujo a lo largo de una única dirección, siendo adecuados para cauces con geometrías simples.
- **Modelos Bidimensionales (2D):** Consideran variaciones en dos direcciones horizontales, permitiendo un análisis más detallado de áreas con geometrías complejas.
- **Modelos Tridimensionales (3D):** Incorporan variaciones en las tres dimensiones espaciales, siendo utilizados para estudios avanzados donde la complejidad del flujo es significativa.

3.2.2.13 Modelación Bidimensional con Hec-Ras. HEC-RAS es una herramienta para desentrañar los misterios del agua. Este programa emplea el Método del Paso Estándar para determinar los niveles de agua en cada segmento transversal. Es crucial dominar las secciones transversales, la distancia entre ellas, el coeficiente de Manning, los flujos y las

condiciones de borde. En una franja, basta con identificar una condición de límite, salvo que el flujo sea mixto. En tal situación, es crucial tener un borde agua arriba y otro agua abajo.

Además, Giraldo (2015) destaca en su estudio que la mayoría de los desafíos en áreas inundables se revelan con mayor precisión en modelos bidimensionales, utilizando técnicas numéricas. En el ámbito de la modelación de la llanura de inundación, las diferencias finitas, elementos o volúmenes finitos ofrecen tanto beneficios como inconvenientes. El arte de las diferencias finitas se fundamenta en la evolución de las series de Taylor, que encarnan una función como un infinito conjunto de términos. Las ecuaciones fundamentales que se solucionan en el modelo son:

- a) **Ecuación de Saint Venant:** Estas ecuaciones describen el flujo transitorio unidimensional a superficie libre en su forma no conservativa y se expresan de la siguiente manera:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial y}{\partial t} + y \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial y}{\partial x} = 0$$

Ecuación de cantidad de movimiento

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{v \partial v}{g \partial x} + \frac{1 \partial v}{g \partial t}$$

Donde:

v: Velocidad media longitudinal (m/s)

y: Profundidad del flujo o calado (m)

x: Distancia longitudinal desde el origen del tramo (m)

S₀: Pendiente del cauce

S_f: Pendiente de fricción o motriz

g: Aceleración de la gravedad

b) Número de Courant

Para elegir el paso temporal se debe tener en cuenta el Número de Courant ya que en esta ecuación se relacionan espacio, velocidad y tiempo. Esta relación debe ser menor igual que la unidad.

$$c = \frac{v * \Delta T}{\Delta x} \leq 1$$

Máximo valor de $c=3$

Donde:

c: Número de Courant

v: Velocidad de Flujo (m/s)

ΔT : Paso de tiempo computacional (seg.)

Δx : Promedio de tamaño de celda (m)

c) Datos de Flujo Permanente:

El torrente de agua en un río puede permanecer inalterado o metamorfosearse con el paso del tiempo. En un escenario subcrítico, solo se aceptan los valores que superan el umbral de seguridad. Es crucial tener en cuenta el sistema de flujo y las condiciones de frontera. Si el régimen de flujo fluctúa entre el subcrítico y el supercrítico, el programa debe funcionar en un esquema dual. En el escenario supercrítico, es imperativo mantener un borde firme en la etapa inicial del río arriba.

Para un régimen mixto, el software HEC-RAS requiere condiciones de borde tanto en la parte superior como en la inferior del río. Una limitación del programa es que, para un flujo que varía gradualmente, se debe adherir a la ley hidrostática. En segmentos donde el flujo cambia rápidamente, el software aplica la ecuación de la cantidad de movimiento.

3.2.2.14 Componentes Esenciales de la Modelación.

- **Datos de Entrada:** Incluyen información sobre la geometría del cauce, condiciones de flujo, características de los sedimentos y parámetros ambientales.
- **Ecuaciones Matemáticas:** Formulaciones que representan las leyes de conservación de masa y energía aplicadas al flujo de agua y al movimiento de sedimentos.
- **Calibración y Validación:** Procesos para ajustar el modelo y asegurar que las simulaciones reproduzcan con precisión las condiciones observadas en el sistema real.

3.2.2.15 Herramientas Computacionales.

- **HEC-RAS:** Desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, permite modelar el flujo de agua y el transporte de sedimentos en sistemas fluviales.

3.3 Definición de términos

Bocatoma: Es el conjunto de obras ubicadas en el cauce (o en su margen) cuya función es captar y derivar parte del caudal del río hacia un canal o conducción, asegurando la operación estable frente a variaciones del nivel, arrastre de sólidos y crecidas; típicamente se apoya en un barrage/azud, una zona de captación y elementos de control/seguridad. (Rocha Felices, 2005).

Caudal de captación: Es el caudal máximo que puede ingresar por el sistema de captación de la bocatoma (ventanas/orificios/vertedero de toma) bajo condiciones hidráulicas definidas, sin comprometer su operación, evitando ingreso excesivo de material sólido o pérdidas de control). En diseño se asocia a la capacidad de las aberturas y su régimen vertedero u orificio. (Rocha Felices, 2005).

Estabilidad del cauce: Se refiere a la capacidad del río para mantener su forma y trazado ancho, profundidad, pendiente, alineamiento y lecho dentro de rangos aceptables en

el tiempo. Un cauce estable se asocia a un equilibrio entre fuerza hidráulica esfuerzo cortante, aporte/transporte de sedimentos y resistencia del material del lecho y márgenes. (Rocha Felices, 1998).

Eficiencia hidráulica máxima: En canales o secciones de flujo, se entiende como la condición geométrica que maximiza la capacidad de conducción para una misma área o para una restricción de diseño, reduciendo “pérdidas” asociadas al rozamiento. En práctica se vincula a maximizar el conveyance (K) y/o el radio hidráulico (A/P) según el marco de cálculo usado. (USACE, s. f.-a).

Pérdida de carga por fricción: Es la disminución de energía del flujo causada por el rozamiento con el contorno lecho y márgenes, que se acumula a lo largo de una distancia. En HEC-RAS, se evalúa como el producto entre una pendiente de fricción representativa y la longitud del tramo, coherente con el concepto de pendiente de la línea de energía. (USACE, s. f.-a).

Diseño hidráulico de bocatoma: Es el proceso de definir dimensiones y cotas de la obra de captación para que funcione en un rango de caudales (estiaje–crecida), garantizando condiciones de captación controlada, protección ante avenidas de diseño, y compatibilidad con el comportamiento fluvial niveles, velocidades, arrastre sólido y socavación/deposición. (Rocha Felices, 2005).

Vertedero de toma: Es la abertura o conjunto de aberturas por donde ingresa el agua desde el río hacia la obra; hidráulicamente puede trabajar como vertedero (flujo libre sobre umbral) o como orificio (flujo presurizado/contraído), dependiendo del tirante y el control aguas abajo. (Rocha Felices, 2005).

Rejillas: Son elementos de barras o perfiles colocados en la captación para retener flotantes y sólidos gruesos (ramas, piedras grandes, residuos) y proteger la conducción y

compuertas. Su diseño debe balancear protección con pérdida de carga y facilidad de limpieza. (Rocha Felices, 2005).

Cámara de decantación: Es un volumen donde se reduce la velocidad del agua para favorecer que partículas sólidas sedimenten por gravedad, disminuyendo el ingreso de arenas y gravas a la conducción. En bocatomas se usa como parte del control de sedimentos para mejorar operación y reducir abrasión/atoros. (Rocha Felices, 2005).

Barraje: Es una estructura transversal que eleva el tirante del río para permitir la captación por gravedad y estabilizar la condición hidráulica en la zona de toma. No necesariamente almacena como una presa; su objetivo principal es derivar y controlar niveles localmente. (Rocha Felices, 2005).

Salto hidráulicos como disipadores de energía: El salto hidráulico es una transición de régimen supercrítico a subcrítico que produce intensa turbulencia y, por eso, se usa en pozas disipadoras para reducir energía y evitar erosión aguas abajo de vertederos, canales o descargas de estructuras. (Rocha Felices, 2005).

Periodo de retorno y diseño de avenidas: El periodo de retorno (o ARI) es el tiempo promedio entre excedencias de una magnitud, una lluvia o crecida y se usa para seleccionar la avenida de diseño (Q asociado a T años) según el nivel de riesgo aceptable y la criticidad de la obra. (National Weather Service [NWS], s. f.).

Modelación hidráulica: Es la representación del comportamiento del flujo en el río mediante un modelo matemático/numérico que resuelve ecuaciones hidráulicas para estimar niveles, velocidades, energía y, según el caso, condiciones no permanentes. Herramientas como HEC-RAS permiten análisis 1D/2D en flujo permanente y no permanente. (USACE, 2023).

Calibración y validación del modelo hidráulico: Calibrar es ajustar parámetros n de Manning, pérdidas locales, condiciones de borde, hasta que el modelo reproduzca

mediciones (niveles, marcas de agua, caudales). Validar es comprobar el desempeño con otro evento o conjunto de datos independiente para evitar “ajustar solo a un caso”. (Federal Emergency Management Agency [FEMA], 2024).

Sedimentación fluvial (deposición): Es el proceso por el cual el material sólido transportado por la corriente se deposita cuando disminuye la capacidad de arrastre (menor velocidad/esfuerzo cortante, remansos por obras, ensanchamientos, etc.), cambiando el lecho y afectando la operación de estructuras como bocatomas y desarenadores. (Rocha Felices, 1998).

Transporte de sedimentos: Es el movimiento de partículas sólidas por acción del flujo, ya sea cerca del lecho (carga de fondo) o dentro de la columna de agua (suspensión). En ingeniería se evalúa para predecir erosión/socavación, deposición y cambios morfológicos que condicionan la estabilidad de obras. (Rocha Felices, 1998).

Esfuerzo cortante de fondo (fuerza tractiva): Es la fuerza por unidad de área que el flujo ejerce sobre el lecho; controla la capacidad de iniciar y mantener el movimiento de partículas. En cauces, se relaciona con el radio hidráulico y la pendiente de energía (idea práctica: a mayor energía y tirante, mayor “arrastre” sobre el fondo). (Rocha Felices, 1998).

Parámetro de Shields (inicio del movimiento): Es un número adimensional que expresa la fuerza tractiva crítica necesaria para que un grano empiece a moverse, considerando peso sumergido y tamaño de partícula. Se usa para estimar umbrales de arrastre y seleccionar fórmulas de transporte sólido según el régimen. (Rocha Felices, 1998).

Curva granulométrica y coeficiente de uniformidad: La curva granulométrica describe cómo se distribuyen los tamaños de partículas en una muestra (porcentaje que pasa vs. diámetro). De ella se deriva, el coeficiente de uniformidad d_{60}/d_{10} , útil para caracterizar dispersión de tamaños y comportamiento hidráulico-sedimentológico. (Rocha Felices, 1998).

Ecuación de Exner: Es la relación de conservación que vincula el cambio del nivel del lecho con la divergencia del transporte sólido: si sale más sedimento del que entra, el lecho tiende a degradarse; si entra más del que sale, el lecho tiende a agredarse (depositarse). Es base en modelación morfológica. (USACE, s. f.-c).

Tipo de software utilizado: En ríos se emplean paquetes 1D/2D que resuelven Saint-Venant y, cuando se requiere, el acoplamiento morfodinámico (lecho móvil); por ejemplo, HEC-RAS 2D incorpora módulos para flujo no permanente y transporte de sedimentos, adecuados para cauces naturales y llanuras de inundación. (USACE, 2023).

Funcionalidades y precisión de datos aplicados: Las funciones clave incluyen generación de mallas no estructuradas o regulares, asignación espacial de rugosidades n de Manning, condiciones de borde/estado y manejo de series temporales; la “precisión” lograda depende críticamente del tamaño de celda y del paso de tiempo elegidos respecto a la complejidad del relieve y de los gradientes hidráulicos. (USACE, s. f.).

Parámetros hidráulicos: Las variables básicas en lámina libre son caudal Q , tirante y , velocidad media V , pendiente de energía S , rugosidad de Manning n , esfuerzo cortante de fondo τ_{by} y número de Froude Fr ; su combinación define el régimen (sub/supercrítico), las pérdidas y la capacidad de transporte. (Sturm, 2001).

Transporte de sedimentos: Es el movimiento de material granular como carga de fondo y suspendida cuando el esfuerzo cortante supera un umbral crítico; su magnitud depende del tamaño/densidad de grano, la turbulencia y la hidráulica, y se vincula a la evolución del lecho mediante la ecuación de continuidad morfológica (Exner). (García, 2008).

Zonas críticas: Son tramos donde el modelo predice altos riesgos de erosión o depósito, identificables por mapas de cambio de cota Δz , esfuerzos cortantes elevados y/o

cercano a 1; en mezclas arena-limo/arcilla, la cohesión del fango eleva el umbral de inicio de movimiento y concentra “hotspots” morfodinámicos. (Deltares, 2020).

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación se entiende como la orientación del estudio según su finalidad: puede ser aplicada cuando busca aportar solución/criterios para un problema real, o básica cuando prioriza ampliar conocimiento sin una aplicación inmediata. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

En esta tesis, la investigación fue aplicada, porque se trabajó con un problema real del río riesgo hidráulico y dinámica de sedimentos se usaron herramientas de modelación para sustentar decisiones técnicas y medidas de mitigación en el tramo de interés.

4.1.2 Nivel de investigación

El nivel indica la profundidad del estudio: un alcance descriptivo caracteriza un fenómeno cómo es y cómo se comporta, sin afirmar causalidad; y puede diferenciarse de alcances exploratorios, correlacionales o explicativos según el objetivo. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

En la tesis el nivel fue descriptivo, porque se caracterizaron caudales, velocidades, tirantes, zonas de erosión/deposición y puntos críticos de desborde a partir de datos y simulaciones, sin manipular variables para probar relaciones causa–efecto.

4.1.3 Diseño de investigación

El diseño define la estrategia para obtener evidencia: en el no experimental no se manipulan variables, sino que se observa y analiza el fenómeno tal como ocurre; además, puede ser transeccional (transversal) si se trabaja con datos de un periodo definido, o longitudinal si se sigue la evolución en el tiempo. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

En la tesis el diseño fue no experimental y transeccional, porque se trabajó con registros hidrológicos, levantamientos y parámetros del periodo de estudio (año hidrológico 2024) y luego se simuló el comportamiento del río en software, sin intervenir físicamente el sistema para alterar sus condiciones.

4.1.4 Enfoque de investigación

El enfoque se refiere a cómo se produce la evidencia: el cuantitativo trabaja con mediciones numéricas y análisis sistemático; el cualitativo interpreta significados y contextos; y el mixto integra ambos. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

En esta tesis, el enfoque fue cuantitativo, porque se emplearon variables numéricas caudales, coeficientes de Manning, geometría del cauce, resultados hidráulicos, parámetros de sedimentos y se generaron salidas cuantificables en las simulaciones; se consideró un escenario de avenida con $T_r=100$ años y un caudal máximo de $1022.20 \text{ m}^3/\text{s}$ como condición de modelación.

4.2 Ámbito temporal y espacial

4.2.1 Ámbito temporal

El ámbito temporal delimita el periodo de datos/análisis, y el ámbito espacial precisa el lugar y el tramo/área exacta del estudio; ambos evitan ambigüedades y hacen trazable la investigación. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

En esta tesis, el ámbito temporal abarcó el año 2024, considerando explícitamente la temporada de lluvias (noviembre 2023–abril 2024) y la temporada de estiaje (mayo–octubre 2024) para interpretar el comportamiento hidráulico y la dinámica de sedimentos bajo condiciones contrastantes, además de simular un evento extremo de diseño.

4.2.2 Espacial

El ámbito espacial precisa ubicación, límites y unidades de análisis (cuena, tramo, márgenes, secciones), normalmente sustentado con cartografía, coordenadas y reconocimiento de campo. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

En esta tesis, el ámbito espacial correspondió al Río Chalhuanca y al tramo de estudio definido en el documento, donde se levantaron secciones y referencias del cauce (incluyendo progresivas consignadas en el informe) y se apoyó la delimitación con modelos de elevación y análisis espacial para ubicar zonas críticas de desborde y acumulación de sedimentos.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

En investigación, la población es el universo sobre el que se pretende concluir, y la muestra es la parte seleccionada de esa población, definida por criterios técnicos y factibilidad, manteniendo coherencia con los objetivos. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

En esta tesis, la población se entendió como el río y su entorno inmediato donde se presenta la problemática, y la muestra se definió como un tramo representativo priorizado por evidencia de erosión/sedimentación y afectación potencial a infraestructura y áreas cercanas.

4.3.2 Muestra

La muestra es una selección de la población; puede definirse por muestreo probabilístico o por criterios técnicos cuando la naturaleza del estudio exige escoger puntos/tramos representativos. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

En esta tesis, la muestra fue un tramo representativo del Río Chalhuanca (5–10 km) comprende todo el tramo de la ciudad de Chalhuanca, seleccionado por criterios como mayor evidencia de sedimentación y erosión, presencia de sectores críticos y relevancia para áreas cercanas; dentro de ese tramo se priorizaron puntos/secciones para levantamiento y análisis en la modelación.

4.4 instrumentos

Los instrumentos son los medios para recolectar y registrar información (formatos, fichas, equipos, software), y deben corresponder a las variables y al enfoque, garantizando consistencia y calidad de datos. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

Software especializado:

- HEC-RAS: Para la modelación hidráulica y de transporte de sedimentos, permitiendo simular caudales, velocidades de flujo y patrones de sedimentación.
- ArcGIS: Para el análisis espacial y la generación de mapas topográficos y geomorfológicos.
- Excel: Para el procesamiento y análisis de datos recolectados.

Equipos de medición en campo:

- Estación total y GPS diferencial (RTK): Para obtener datos precisos de coordenadas y altimetría del terreno.
- Sensores de nivel y velocidad de flujo: Para medir caudales y velocidades directamente en el río.
- Muestreador de sedimentos: Para recolectar y analizar muestras de sedimentos en puntos estratégicos del río.

Bases de Datos y documentos secundarios:

- Registros hidrológicos y meteorológicos: Proporcionados por entidades como SENAMHI y ANA.
- Imágenes satelitales y modelos digitales del terreno (MDT): Para identificar zonas críticas de erosión y acumulación de sedimentos.

4.5 Procedimientos

Los procedimientos describen la secuencia operativa del estudio (planificación, recolección, procesamiento, análisis y reporte) para que otra persona pueda replicar el trabajo y auditar su trazabilidad. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

Fase de planificación:

- Delimitación del área de estudio: Identificar el tramo específico del río Chalhuanca a analizar, considerando zonas críticas de erosión y sedimentación.
- Revisión bibliográfica: Consultar estudios previos, registros hidrológicos y geomorfológicos proporcionados por entidades como SENAMHI y ANA.
- Definición de instrumentos: Seleccionar las herramientas y equipos necesarios para la recolección de datos.

Fase de recopilación de datos:

Trabajo de campo:

- Levantamiento topográfico con estación total y GPS diferencial (RTK) para obtener datos precisos del terreno.
- Medición de caudales y velocidades de flujo en puntos clave del río utilizando sensores hidráulicos.
- Recolección de muestras de sedimentos en zonas representativas para su análisis en laboratorio.

datos secundarios:

- Adquisición de registros históricos hidrológicos y meteorológicos.
- Descarga de imágenes satelitales y modelos digitales del terreno (MDT).

Fase de procesamiento de datos:**Análisis de datos en software especializado:**

- Ingresar parámetros hidrológicos, geomorfológicos y sedimentológicos en HEC-RAS para modelar el comportamiento hidráulico y el transporte de sedimentos.
- Validación de datos: Verificar la coherencia de los datos ingresados mediante la comparación con registros históricos y observaciones de campo.

Fase de simulación y análisis:

- Modelación en HEC-RAS: Realizar simulaciones para analizar:
- Caudales y velocidades del flujo.
- Patrones de erosión y sedimentación.
- Identificación de zonas críticas de acumulación y erosión.
- Generación de resultados: Exportar gráficos, mapas y tablas con los resultados obtenidos.

4.6 Análisis de datos

El análisis de datos implica ordenar, depurar, transformar e interpretar la información según el enfoque; en cuantitativo, se prioriza consistencia numérica, comparación de escenarios y presentación clara de resultados. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

El análisis de datos se realizará mediante la organización y limpieza de información recolectada en campo y registros secundarios, procesándola en software como ArcGIS para generar mapas temáticos y en HEC-RAS para modelar caudales, transporte de sedimentos y

patrones de flujo del río Chalhuanca. Las simulaciones permitirán identificar zonas críticas de erosión y acumulación, así como volúmenes de sedimentos transportados, con resultados validados mediante la comparación con datos reales. Finalmente, se interpretarán los resultados a través de gráficos, mapas y tablas, destacando implicancias prácticas para la gestión de recursos hídricos y mitigación de riesgos en la cuenca.

4.7 Consideraciones éticas

La ética en investigación exige integridad de la información, trazabilidad del proceso, respeto por el entorno y uso responsable de fuentes, evitando manipulación de resultados y asegurando transparencia metodológica. (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Ruiz Huaraz y Valenzuela Ramos, 2022).

Esta investigación garantizará el respeto al medio ambiente mediante la realización de actividades de campo con impacto mínimo en el ecosistema del río Chalhuanca. Además, se asegurará el consentimiento informado de las comunidades locales cuando corresponda, así como la confidencialidad en el manejo de los datos recolectados, que serán utilizados exclusivamente con fines académicos. Los procedimientos y resultados serán documentados con transparencia para garantizar su verificabilidad, y el trabajo se regirá por las normativas éticas y legales establecidas por las autoridades competentes y la institución académica, promoviendo un desarrollo responsable y respetuoso del proyecto.

V. Resultados y discusión

El estudio del comportamiento hidráulico y sedimentario del río Chalhuanca es crucial debido a los desafíos generados por los fenómenos climáticos que afectan al distrito de Chalhuanca. En los últimos años, el río ha experimentado eventos extremos de inundaciones y erosión, ocasionando impactos significativos tanto en las comunidades cercanas como en las infraestructuras públicas y privadas. Este problema se atribuye a factores como el aumento de los caudales máximos durante periodos de retorno prolongados, la acumulación de sedimentos en puntos críticos y la insuficiencia de defensas ribereñas efectivas.

La relevancia de este estudio radica en ofrecer un diagnóstico técnico y científico que sirva como base para la toma de decisiones en la gestión del río Chalhuanca. En este marco, el capítulo presenta los hallazgos obtenidos mediante herramientas avanzadas de modelado hidráulico y sedimentario, como HEC-RAS e IBER, ampliamente utilizadas para evaluar dinámicas fluviales, áreas de inundación y transporte de sedimentos en diversos contextos.

5.1 Resultados del Modelamiento Hidráulico

5.1.1 Consideraciones iniciales

Para llevar a cabo un análisis hidráulico y sedimentario del río Chalhuanca, fue imprescindible disponer de una base de datos que contenga información hidrológica, topográfica y geomorfológica del área de estudio. Este conjunto de datos sirve para configurar y validar los modelos computacionales, garantizando la precisión en las simulaciones realizadas con herramientas como HEC-RAS e IBER. A continuación, se detallan las principales consideraciones iniciales que se tomaron en cuenta para este análisis:

Datos hidrológicos

La caracterización hidrológica del río Chalhuanca se llevó a cabo utilizando caudales máximos estimados para diferentes periodos de retorno (Tr), obtenidos del estudio hidrológico previo. Estos valores fueron fundamentales para simular escenarios extremos y diseñar intervenciones hidráulicas.

El caudal máximo identificado para un periodo de retorno de 100 años es de 1022.20 m³/s, convirtiéndose en el valor de referencia para las simulaciones más críticas. Este *Nota* se obtuvo a través de un análisis hidrológico detallado que incluyó herramientas como HEC-HMS y el uso de la curva Creager.

Tabla 2

Caudales máximos de diseño

Tr (Años)	Caudales Máximos (m ³ /seg)			
	Hec - HMS	Creager	Hidráulico	Q max Diseño
10	560.20	475.25	548.52	560.20
50	863.80	807.44		863.80
100	1022.20	950.50		1022.20
200	1201.90	1093.56		1201.90
500	1471.70	1282.68		1471.70

Nota. Los valores de la tabla corresponden al estudio hidrológico que se encuentra en los anexos, resume los caudales máximos adoptados para el diseño hidrológico del río, empleados como escenarios de evaluación.

a. Hidrograma de diseño:

Se utilizó un hidrograma adimensional para representar cómo varía el caudal a lo largo del tiempo durante un evento extremo. Este hidrograma abarca un periodo de simulación suficiente para observar el comportamiento completo del flujo, desde el inicio del evento hasta que el caudal se drena por completo.

Tabla 3

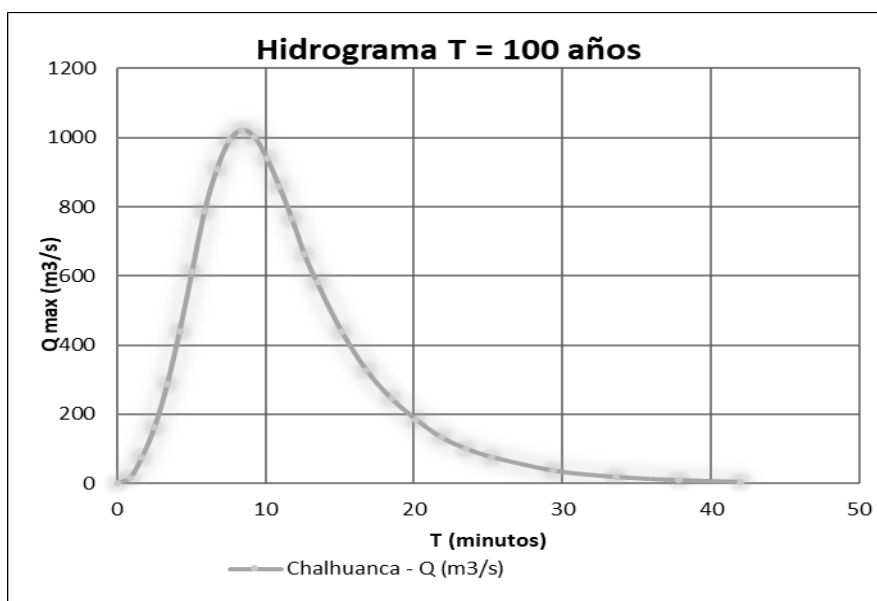
Hidrograma de caudales para el río Chalhuanca para un T=100 años

Hidrograma para T = 100 años		
t (horas)	t (seg)	Chalhuanca Q (m³/s)
0.00	0.00	0.00
0.84	151.20	15.33
1.68	302.40	76.67
2.52	453.60	163.55
3.36	604.80	286.22
4.20	756.00	439.55
5.04	907.20	613.32
5.88	1058.40	787.09
6.72	1209.60	909.76
7.56	1360.80	991.53
8.40	1512.00	1022.20
9.24	1663.20	1001.76
10.08	1814.40	940.42
10.92	1965.60	858.65
11.76	2116.80	766.65
12.60	2268.00	664.43
13.44	2419.20	582.65
15.12	2721.60	439.55
16.80	3024.00	327.10
18.48	3326.40	245.33
20.16	3628.80	184.00
21.84	3931.20	132.89
23.52	4233.60	100.18
25.20	4536.00	76.67
29.40	5292.00	36.80
33.60	6048.00	18.40
37.80	6804.00	9.20
42.00	7560.00	4.09

Nota. los valores de la tabla corresponden al estudio hidrológico que se encuentra en los anexos, la tabla presenta la variación del caudal en el tiempo para el evento extremo (T=100 años), mostrando el crecimiento y la recesión.

Figura 1

Hidrograma de caudales para el río Chalhuanca para un $T=100$ años



Nota. La figura representa gráficamente el hidrograma del evento $T=100$ años, evidenciando el pico y la duración de la avenida.

Datos topográficos y geomorfológicos

La topografía y geomorfología del río Chalhuanca se obtuvieron mediante técnicas de medición en campo, generando un modelo digital del terreno (DEM) de alta resolución. Este modelo fue clave para definir la geometría del cauce y las condiciones del entorno fluvial.

1. Levantamiento topográfico y batimétrico:

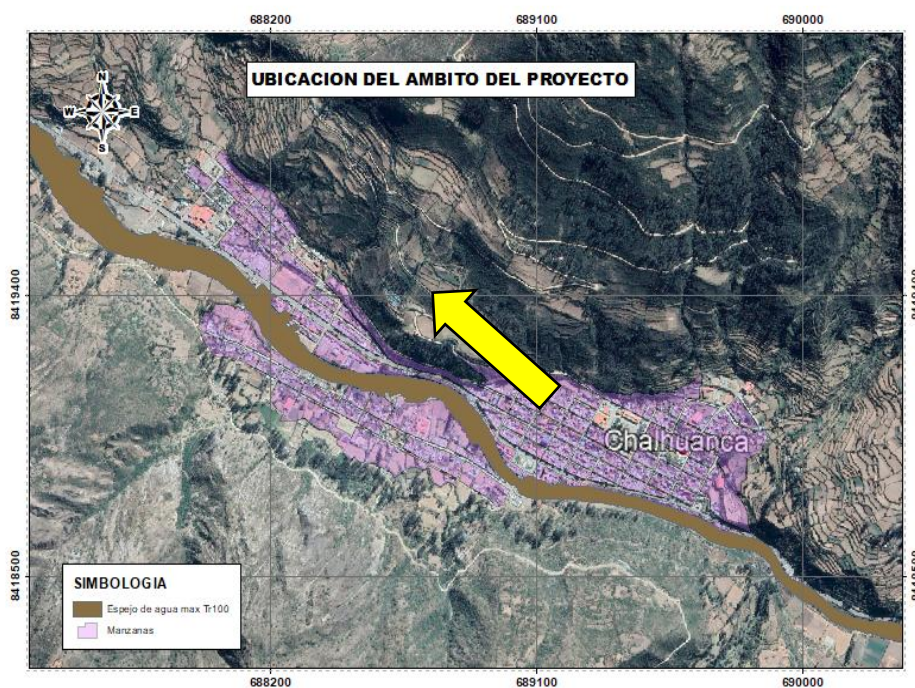
- Se realizaron levantamientos detallados del cauce del río y de las áreas adyacentes, incluyendo secciones transversales y perfiles longitudinales progresivos.
- De acuerdo con las recomendaciones de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), se consideraron márgenes de 30 a 50 metros a ambos lados del cauce, así como extensiones de 500 a 300 metros aguas arriba y aguas abajo del área de estudio.

2. Modelo Digital de Elevación (DEM):

- El DEM generado se utilizó para construir la geometría del modelo en los softwares HEC-RAS e IBER, proporcionando una representación precisa de las condiciones del río.
- Herramientas de generación de mallas, como "RTIN" en IBER y "RAS Mapper" en HEC-RAS, permitieron ajustar los parámetros geométricos, garantizando la precisión en las simulaciones.

Figura 2

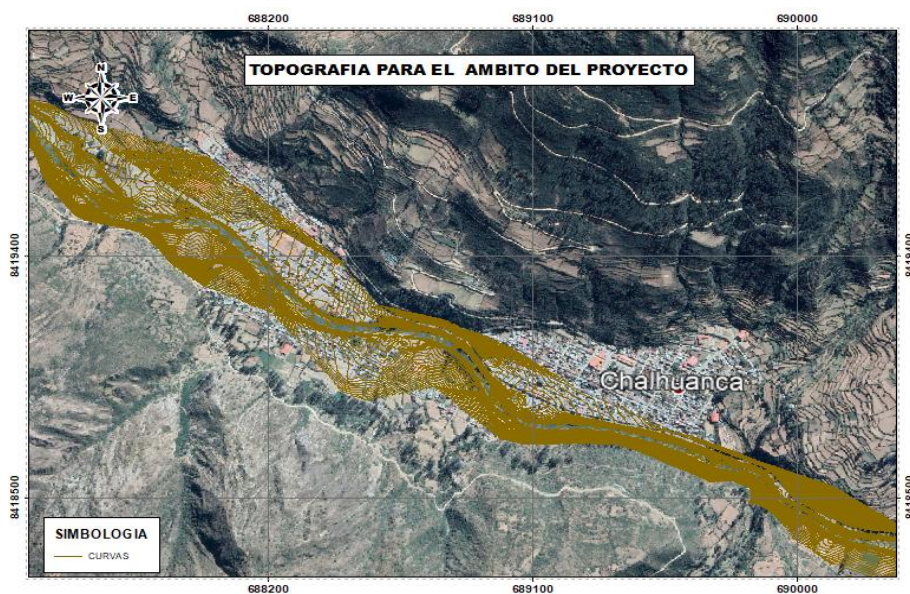
Esquema hidráulico



Nota. La figura muestra el esquema del tramo modelado, incluyendo el cauce, elementos de referencia y condiciones principales del sistema.

Figura 3

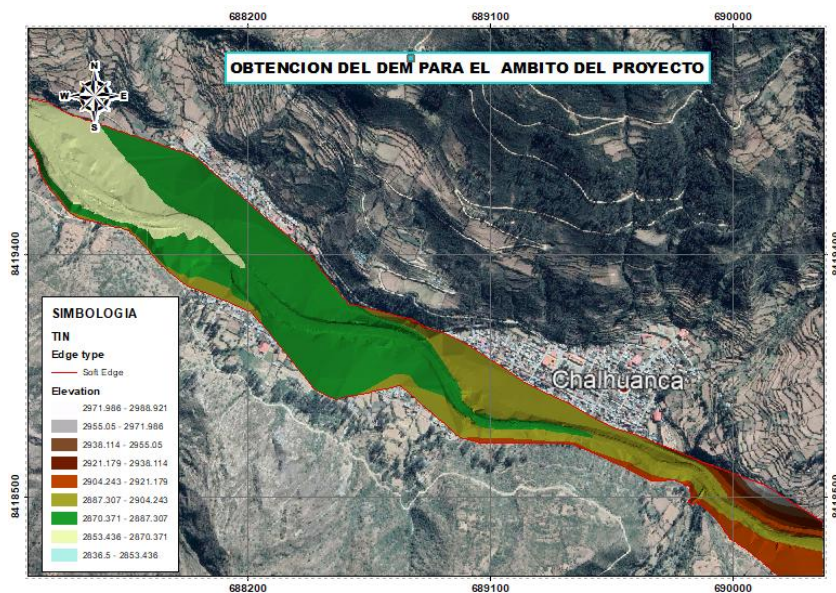
Modelos de elevación digital del área en estudio



Nota. La figura presenta el modelo digital de elevación (MDE) usado para representar el relieve del área evaluada.

Figura 4

Modelos de elevación digital del área en estudio



Nota. La figura muestra otra vista/escala del MDE, resaltando la configuración topográfica del tramo de estudio.

Rugosidad del cauce y coeficientes de Manning

La rugosidad del cauce y de las áreas circundantes se caracterizó asignando coeficientes de Manning, los cuales varían dependiendo de la cobertura del suelo. Este parámetro es esencial para determinar la resistencia al flujo dentro del río y en sus márgenes.

Cauce principal: Se asignó un coeficiente de Manning de 0.035, correspondiente a un lecho fluvial compuesto por sedimentos medianos y gruesos.

Regadíos y áreas agrícolas: Se utilizó un coeficiente de 0.050, debido a la presencia de vegetación densa en estas zonas.

Infraestructura y zonas urbanas: Se estableció un coeficiente de 0.020, representando áreas con menor resistencia al flujo."

Tabla 4

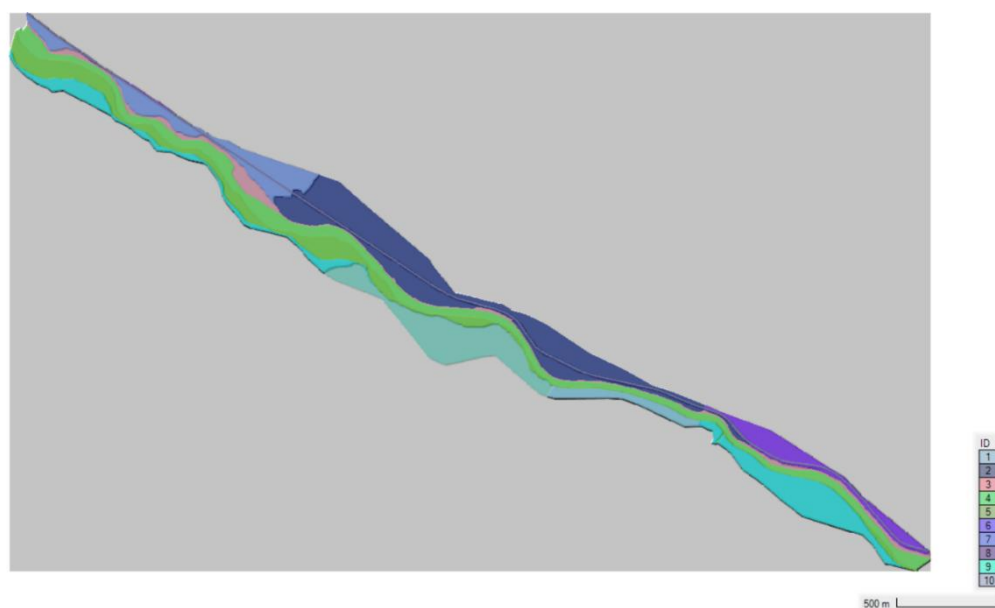
Coefficiente de manning

Usos de Suelo	Manning
Cauce	0.035
Regadío	0.050
Secano	0.045
Pastizal y Matorral	0.050
Infraestructura	0.020
Pradera	0.050
Improductivo	0.020

Nota. La tabla consigna los valores de rugosidad de Manning asignados según tipo de superficie cauce y márgenes.

Figura 5

Asignación de coeficiente de manning



Nota. La figura muestra la distribución espacial de los coeficientes de rugosidad, diferenciando zonas con distinta cobertura/suelo.

Configuración inicial de los modelos

a. Condiciones de contorno:

- Se definieron como condiciones iniciales un caudal nulo (calado seco), simulando el inicio del evento extremo.
- **Condiciones de salida:** Se aplicaron bordes de tipo vertedero para modelar el drenaje del flujo hacia los tramos aguas abajo.

Tabla 5

Asignación de condiciones de contorno

Rio	Fase	Tiempo (Seg)	Q (m ³ /s)
Chalhuanca	Inicial	0	0
	Pico	1512.0	1022.20
	Final	7560.0	4.09

Nota. La tabla resume las condiciones iniciales y de contorno usadas para ejecutar la simulación entrada/salida y estado inicial.

b. Tiempo de simulación:

- En el modelo HEC-RAS, se estableció un tiempo de simulación que abarcó desde el aumento del caudal hasta alcanzar el pico máximo, seguido de su descenso, permitiendo analizar el comportamiento completo del río.

c. Generación de la malla de cálculo:

- En IBER, se utilizó una malla triangular generada con tolerancias de 0.1 m en altitud y un lado máximo de triángulo de 2.5 m. Esto permitió obtener una representación detallada del flujo y de las áreas de inundación."

La recopilación y sistematización adecuada de los datos iniciales fue fundamental para garantizar la precisión de las simulaciones realizadas. Cada parámetro se seleccionó meticulosamente para reflejar las condiciones reales del río Chalhuanca, asegurando que los resultados obtenidos sean confiables y útiles para la planificación de intervenciones.

Estas consideraciones iniciales no solo respaldan el análisis técnico, sino que también destacan la importancia de actualizar periódicamente los datos empleados en los modelos. Esto permite que las simulaciones futuras se ajusten a los cambios en el comportamiento hidráulico y sedimentario del río.

5.1.2 Simulación Hidráulica en IBER

La simulación hidráulica del río Chalhuanca, realizada con el software IBER, permitió analizar las zonas de inundación, las velocidades de flujo y los niveles de agua en un escenario sin intervención. Este modelo bidimensional es ampliamente reconocido en ingeniería fluvial por su capacidad para representar de manera precisa el comportamiento hidráulico en ríos y cuencas complejas. A continuación, se presentan las configuraciones, resultados y observaciones obtenidas durante la simulación.

5.1.2.1 Configuración del modelo en IBER. El modelo IBER se configuró teniendo en cuenta las características geomorfológicas e hidrológicas del río Chalhuanca. La organización de los datos incluyó:

1. Información topográfica y batimétrica:

- Se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM) del área de estudio, obtenido mediante levantamientos de campo. Este DEM permitió definir con exactitud la geometría del cauce y las zonas adyacentes.
- Se incorporaron al modelo las progresivas transversales y longitudinales del río, asegurando una representación precisa del área de simulación.

Figura 6

Esquema hidráulico



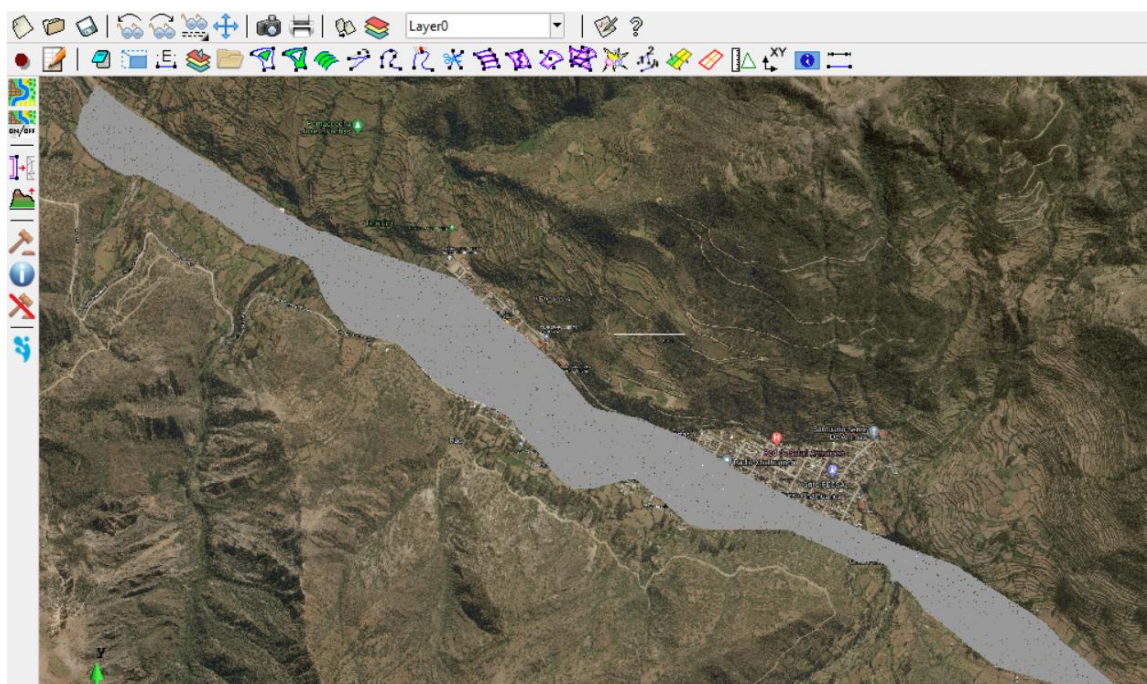
Nota. La figura presenta el esquema hidráulico y la ubicación del ámbito del proyecto, identificando el cauce, el entorno intervenido y zonas aledañas.

2. Generación de malla de cálculo:

- La malla fue generada utilizando la herramienta "RTIN" de IBER, configurada con una tolerancia máxima de 0.1 m y un tamaño máximo de triángulo de 2.5 m. Esta configuración permitió capturar con precisión los detalles del flujo y las áreas de inundación.

Figura 7

Construcción de la malla en IBER



Nota. La figura muestra la delimitación del tramo del río y la configuración de la malla de cálculo en IBER sobre una base satelital.

3. Asignación de coeficientes de rugosidad:

- Los coeficientes de Manning se asignaron de acuerdo con las características de los diferentes tipos de suelo en el área de estudio:
- **Cauce:** 0.035
- **Zonas agrícolas y pastizales:** 0.050
- **Infraestructura urbana:** 0.020"

Tabla 6

Coefficiente de manning

Usos de Suelo	Manning
Cauce	0.035
Regadío	0.050
Secano	0.045
Pastizal y	0.050
Matorral	

Usos de Suelo	Manning
Infraestructura	0.020
Pradera	0.050
Improductivo	0.020

Nota. La tabla presenta un conjunto de valores de Manning aplicado al tramo/escenario correspondiente del modelo.

4. Condiciones iniciales y de contorno:

- **Condición inicial:** Todo el sistema fue configurado como seco, simulando el inicio de un evento de caudal máximo.
- **Condición de contorno:** Se estableció un vertedero en la salida del río para modelar el drenaje hacia aguas abajo.

Tabla 7

Asignación de condiciones de contorno

Río	Fase	Tiempo (Seg)	Q (m ³ /s)
Chalhuanca	Inicial	0	0
	Pico	1512.0	1022.20
	Final	7560.0	4.09

Nota. La tabla detalla las condiciones de contorno utilizadas en una corrida adicional del modelo, con sus parámetros de frontera.

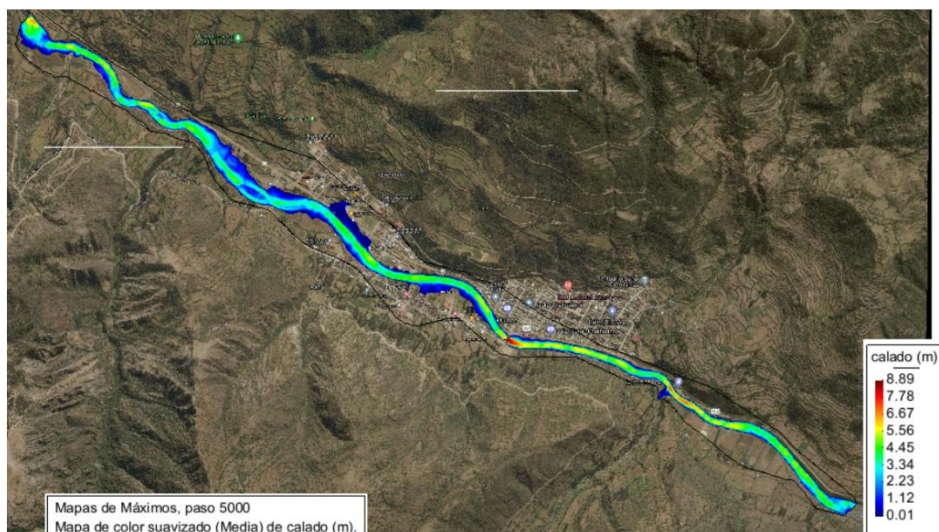
5.1.2.2 Resultados de la simulación. El modelo IBER permitió identificar aspectos clave del comportamiento hidráulico del río Chalhuanca en su situación actual:

1. Zonas de inundación:

- Se generaron mapas que resaltan las áreas críticas del río. Las zonas más afectadas incluyen el sector de Pairaca, donde el desbordamiento del cauce impacta tanto áreas urbanas como agrícolas.
- La simulación reveló que estas áreas permanecen inundadas por un periodo prolongado, lo que aumenta el riesgo para la infraestructura y las comunidades locales.

Figura 8

Simulación hidráulica resultado del IBER – situación actual



Nota. La figura muestra los resultados del modelamiento en IBER para la condición actual del río, representando el comportamiento del flujo.

Figura 9

Mapa de inundación de todo el proyecto



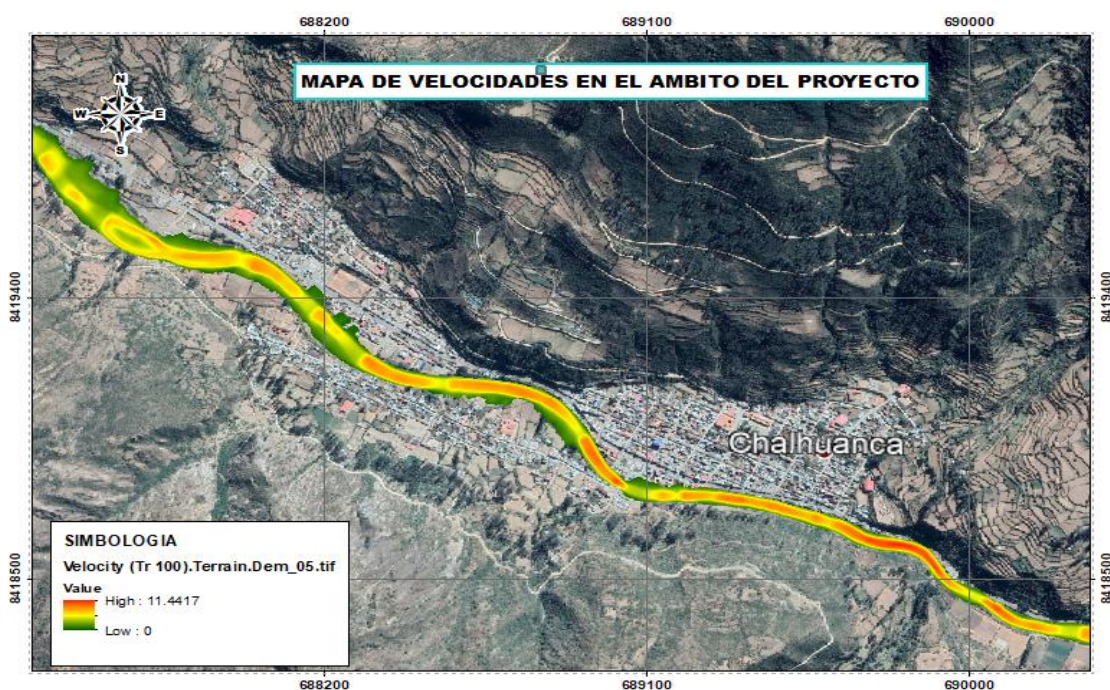
Nota. La figura delimita las áreas potencialmente inundables bajo el escenario simulado, mostrando la extensión del anegamiento.

2. Velocidades del flujo:

- Los mapas de velocidad generados por IBER identificaron tramos con flujos críticos. Estas áreas presentan velocidades altas que contribuyen a la erosión de las márgenes del río.
- En sectores como Chalhuanca aguas abajo, las velocidades exceden los valores aceptables para la estabilidad de las estructuras ribereñas existentes.

Figura 10

Mapa de velocidades en el ámbito del proyecto



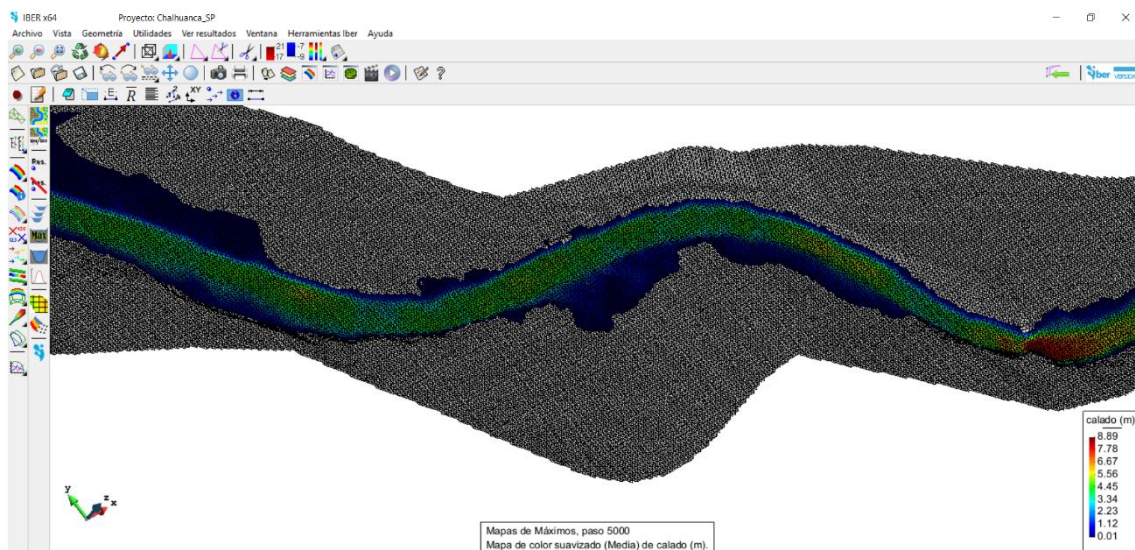
Nota. La figura presenta la distribución de velocidades del flujo, identificando tramos con mayor energía hidráulica.

3. Tirantes de agua:

- La altura del agua alcanzó niveles críticos en varias progresivas del río, superando las capacidades hidráulicas actuales del cauce.

Figura 11

Vista en 2D del río Chalhuanca – tirante de agua



Nota. La figura muestra la profundidad (tirante) del flujo en representación 2D, evidenciando variaciones espaciales del nivel de agua.

5.1.2.3 Discusión de los resultados. La simulación hidráulica realizada con IBER proporcionó una representación bidimensional detallada del comportamiento del flujo, resaltando las siguientes observaciones:

- Las áreas inundables detectadas corresponden a zonas urbanas y agrícolas críticas, como Pairaca y Chalhuanca.
- Las velocidades elevadas en ciertas secciones representan un riesgo significativo para las defensas ribereñas y las estructuras existentes.
- La precisión del modelo IBER facilita la visualización de los flujos de agua en un escenario actual, ayudando en la planificación de intervenciones futuras.

5.1.2.4 Importancia de la simulación con IBER. El empleo del software IBER fue clave para comprender la dinámica hidráulica del río Chalhuanca. Su capacidad para generar mapas temáticos y representar el flujo en dos dimensiones brinda una perspectiva integral

del comportamiento del río bajo condiciones extremas. Estos resultados no solo refuerzan la necesidad de implementar medidas de mitigación, sino que también sirven como base de comparación con otras herramientas, como HEC-RAS.

En conclusión, la simulación con IBER permitió identificar áreas vulnerables y proporcionó información clave para el diseño de estrategias de gestión del río Chalhuanca. Las zonas críticas detectadas serán tratadas en secciones posteriores del estudio, donde se plantearán medidas estructurales y no estructurales para mitigar los riesgos asociados al comportamiento hidráulico del río.

5.1.3 Simulación hidráulica en HEC-RAS

El software HC-RAS fue empleado para modelar el comportamiento hidráulico del río Chalhuanca en un escenario actual. Este modelo unidimensional, ampliamente reconocido por su precisión en la simulación de flujos en ríos y canales, permitió identificar zonas críticas de desbordes, velocidades peligrosas y tirantes de agua elevados a lo largo del cauce. A continuación, se presentan la configuración, los resultados y la relevancia de esta simulación.

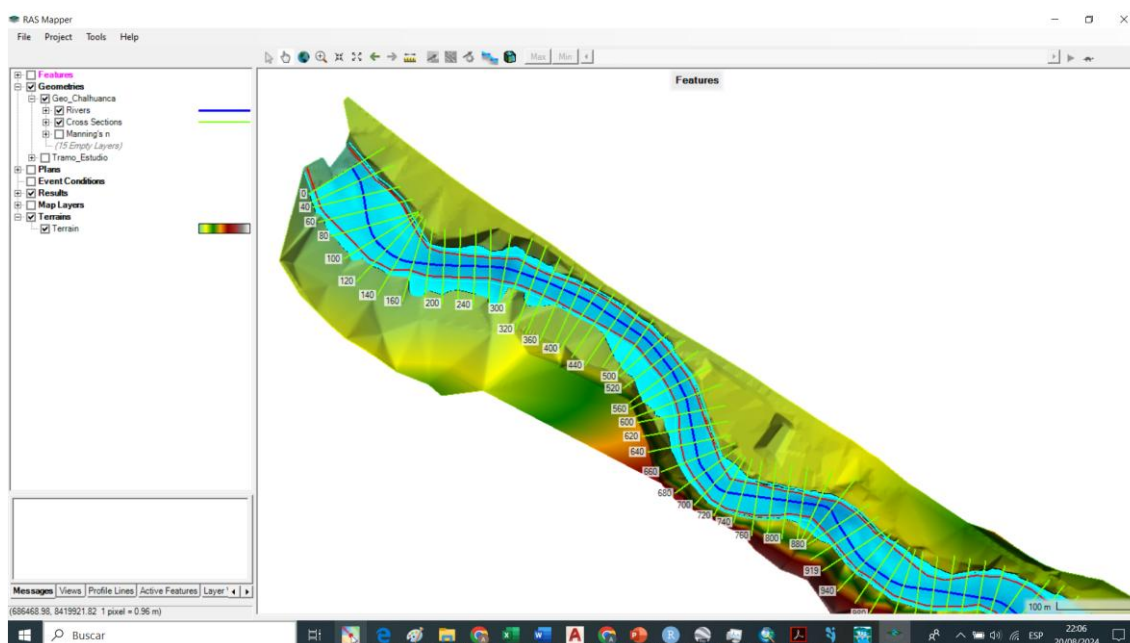
5.1.3.1 Configuración del modelo en HEC-RAS. El modelo HEC-RAS fue configurado teniendo en cuenta los parámetros hidrológicos, topográficos y geomorfológicos específicos del río Chalhuanca, garantizando una representación precisa de sus condiciones hidráulicas.

a. Geometría del cauce:

- La geometría del río fue generada en el módulo RAS Mapper mediante la importación de un Modelo Digital del Terreno (DEM) en formato .TIF desde ArcGIS.
- Se definieron secciones transversales a lo largo del cauce, con distancias que varían entre 30 y 50 metros, asegurando un nivel de detalle adecuado en las áreas de interés.

Figura 12

Construcción de la geometría en HEC-RAS



Nota. La figura evidencia la generación de la geometría del modelo en HEC-RAS trazado, secciones y configuración del cauce.

b. Datos de entrada:

- **Caudales máximos:** Para un periodo de retorno de 100 años, se consideró un caudal máximo de 1022.20 m³/s.
- **Condiciones iniciales:** El modelo fue configurado con un flujo inicial nulo, simulando el inicio de un evento de avenida.
- **Condiciones de contorno:** Se establecieron bordes de tipo vertedero en la salida del sistema para representar el drenaje del flujo.

Tabla 8

Asignación de condiciones de contorno en HEC-RAS

Rio	Fase	Tiempo (Seg)	Q (m ³ /s)
Chalhuanca	Inicial	0	0
	Pico	1512.0	1022.20
	Final	7560.0	4.09

Nota. La tabla presenta los parámetros de frontera e inicio definidos en HEC-RAS para ejecutar la simulación del tramo.

c. Rugosidad del cauce:

Los coeficientes de Manning se asignaron en función de las características de la superficie del suelo:

- **Cauce principal:** 0.035
- **Regadíos y pastizales:** 0.050
- **Infraestructura urbana:** 0.020

Tabla 9

Coefficiente de manning

Usos de Suelo	Manning
Cauce	0.035
Regadío	0.050
Secano	0.045
Pastizal y Matorral	0.050
Infraestructura	0.020
Pradera	0.050
Improductivo	0.020

Nota. La tabla muestra los valores de rugosidad adoptados en HEC-RAS para cauce y zonas laterales.

d. Simulación permanente:

La simulación se ejecutó bajo un régimen de flujo permanente, incrementando gradualmente el caudal hasta alcanzar el pico máximo y permitiendo analizar el comportamiento completo del río.

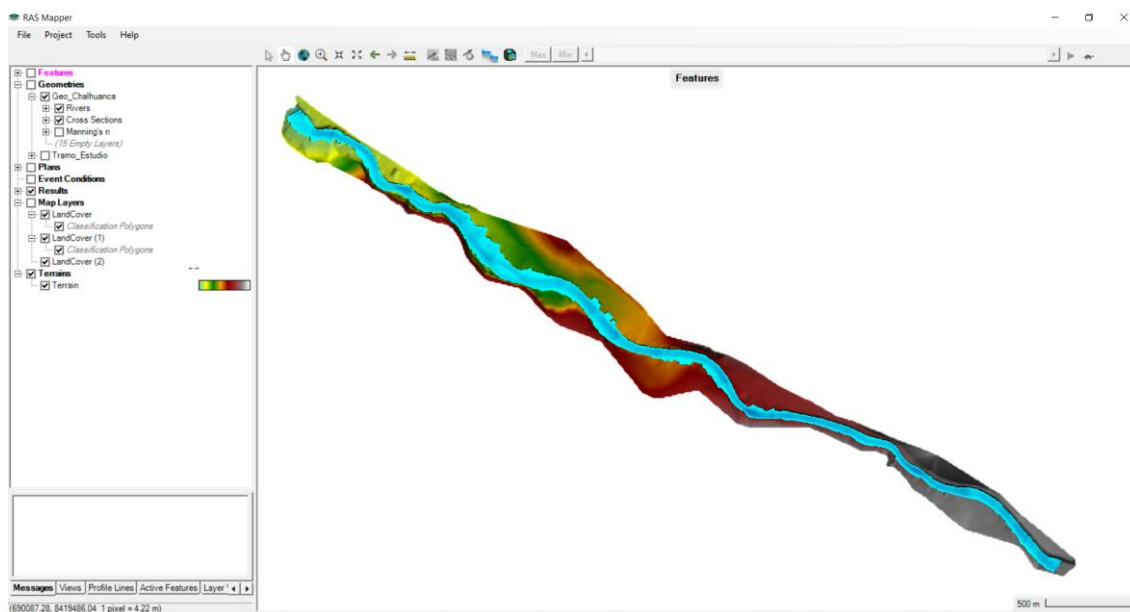
5.1.3.2 Resultados de la simulación. La simulación en HEC-RAS proporcionó un análisis detallado del comportamiento hidráulico del río Chalhuanca, destacando los siguientes aspectos clave:

a. Zonas de inundación:

- Se generaron mapas unidimensionales que identifican las áreas más vulnerables a inundaciones. Sectores como Pairaca y algunas partes del área urbana de Chalhuanca fueron reconocidos como zonas críticas.
- En estas áreas, el agua excede los límites del cauce, afectando unidades productivas y viviendas ubicadas dentro de la faja marginal.

Figura 13

Simulación hidráulica resultado del HEC-RAS – situación actual



Nota. La figura presenta los resultados del modelamiento en HEC-RAS para la condición actual, mostrando la respuesta del flujo en el tramo.

b. Velocidades del flujo:

- Las velocidades elevadas se concentraron en tramos específicos del río, principalmente en las progresivas donde el cauce presenta pendientes pronunciadas. Estas condiciones incrementan el riesgo de erosión en las márgenes del río.

Figura 14

Mapa de velocidades en el ámbito del área de estudio



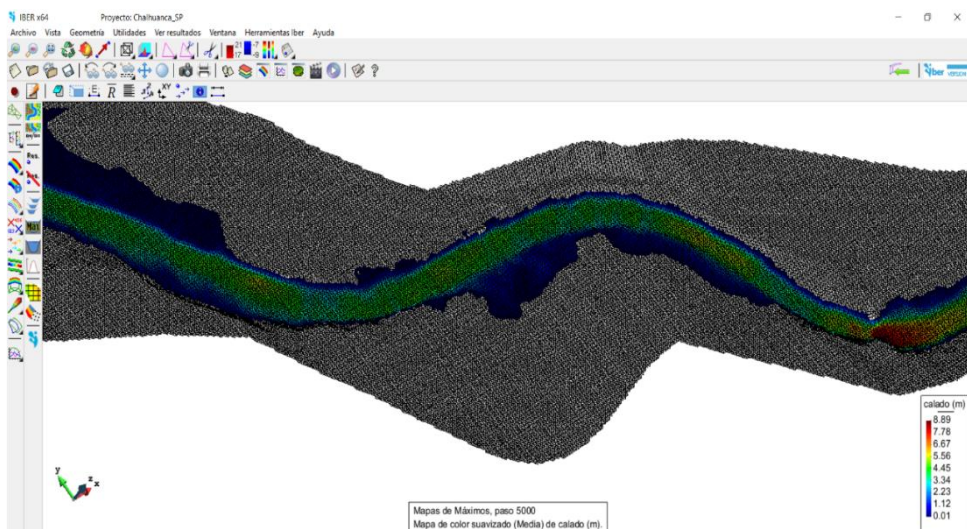
Nota. La figura muestra la variación espacial de velocidades dentro del área de estudio, destacando sectores de mayor intensidad.

c. Tirantes de agua:

En ciertas secciones, los tirantes de agua alcanzaron niveles críticos, superando la capacidad hidráulica del cauce. Este fenómeno se observó especialmente en los tramos aguas abajo, donde la topografía limita la capacidad de evacuación del flujo.

Figura 15

Vista en 2D del río Chalhuanca – tirante de agua



Nota. La figura representa el tirante de agua en 2D para el tramo analizado, evidenciando zonas con mayor profundidad.

d. Progresivas críticas:

- Se identificaron puntos específicos con desbordes y velocidades peligrosas:
- **Progresiva 5+040:** Zona con tirantes elevados.
- **Progresiva 4+500:** Sector con velocidades críticas y alto riesgo de erosión.

5.1.3.3 Discusión de los resultados

El análisis hidráulico realizado en HEC-RAS destacó su eficacia para identificar progresivas críticas donde se concentran los riesgos de inundación y erosión. Aunque se trata de un modelo unidimensional, proporciona resultados precisos para:

- Evaluar el comportamiento del flujo en secciones transversales específicas.
- Identificar zonas prioritarias para la implementación de defensas ribereñas.

Al comparar estos resultados con los obtenidos mediante IBER, se observa que HEC-RAS es más efectivo para detallar puntos específicos del cauce, mientras que IBER ofrece una visión más amplia del flujo en áreas bidimensionales.

5.1.3.4 Importancia de la simulación con HEC-RAS

La simulación hidráulica en HEC-RAS aportó información clave para el diagnóstico del río Chalhuanca. Los mapas generados de velocidades, tirantes y zonas de desbordes permiten priorizar intervenciones en áreas vulnerables y evaluar la efectividad de posibles soluciones estructurales. Además, este modelo facilita la creación de escenarios futuros, fundamentales para una gestión hidráulica sostenible.

En conclusión, el uso de HEC-RAS confirmó la existencia de zonas críticas que requieren intervenciones inmediatas para reducir los riesgos asociados al comportamiento hidráulico del río. Estas observaciones serán fundamentales en los próximos capítulos, donde se

plantearán soluciones enfocadas en proteger la infraestructura y garantizar la seguridad de las comunidades cercanas.

5.1.4 Resultados del Modelamiento Sedimentario

5.1.4.1 Análisis granulométrico. El análisis granulométrico es una etapa fundamental en la evaluación del transporte de sedimentos en el río Chalhuanca, ya que permite caracterizar la composición del lecho fluvial y entender cómo interactúan los sedimentos con el flujo de agua. Este análisis resulta esencial para identificar áreas vulnerables a procesos de erosión y acumulación, además de validar los parámetros sedimentarios utilizados en la simulación realizada con el software HEC-RAS.

Datos recopilados en el estudio granulométrico

a. Toma de muestras:

- Para el análisis granulométrico, se realizaron 14 calicatas distribuidas estratégicamente a lo largo del cauce del río Chalhuanca.
- Las ubicaciones de estas calicatas se seleccionaron en puntos representativos del área de estudio, teniendo en cuenta sectores de acumulación y erosión identificados durante el levantamiento de campo.

Tabla 10

Ubicación de calicatas

Calicata	Este	Norte
C_01	690251	8418347
C_02	689975	8418451
C_03	689871	8418603
C_04	689688	8418648
C_05	689480	8418470
C_06	689341	8418768
C_07	688977	8418820
C_08	688834	8419035
C_09	688291	8419180
C_10	688403	8419168

Calicata	FS_0.25m	MS_0.5m	CS_1m	VCS_2m	VFG_4m	FG_8m	MG_16m	CG_32m	EST E	NORT E
C_10	1.2614	6.0159	23.5951	33.6011	50.8354	70.854	94.7556	100	68840	841916
									3	8
C_11	1.9212	7.0765	42.9395	54.2859	74.8319	83.0612	94.6526	100	68808	841948
									2	3
C_12	3.3091	5.299	24.8372	39.3724	56.0391	67.1995	90.2011	100	68757	841970
									7	6
C_13	2.315	5.5591	29.6037	43.2408	59.2073	68.362	88.36	100	68754	841995
									3	9
C_14	0.5351	13.0218	39.5648	39.5648	75.7403	90.3675	96.147	100	68696	842010
									5	2

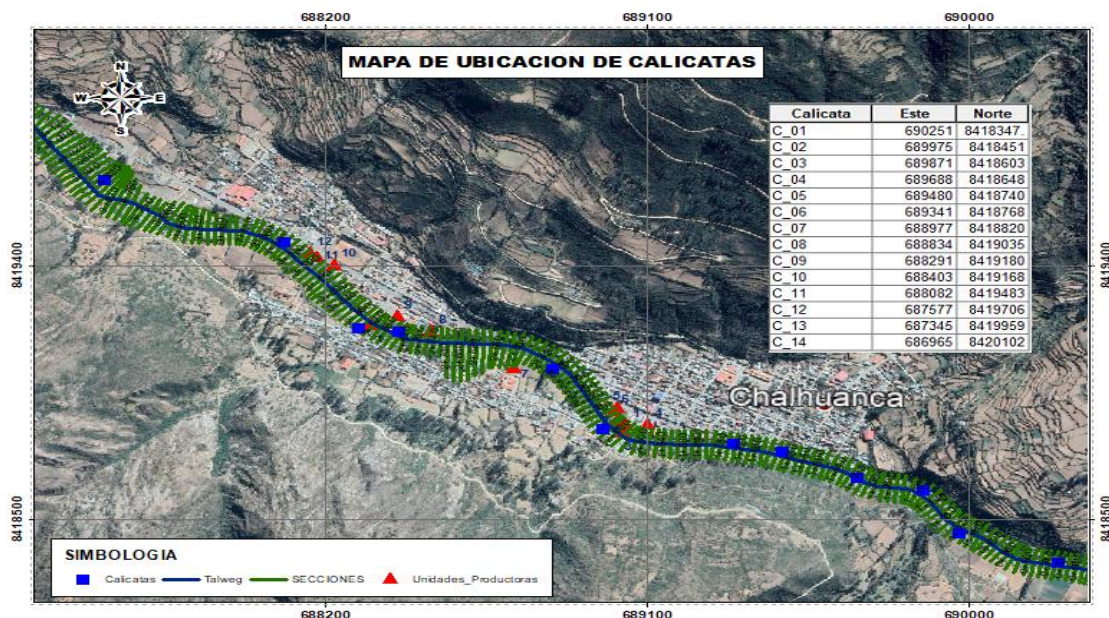
Nota. La tabla resume el comportamiento granulométrico mediante porcentajes retenidos acumulados por tamiz.

f. Mapa de ubicación:

- Para facilitar la interpretación, se generó un mapa temático que muestra la ubicación geográfica de cada calicata, permitiendo visualizar la distribución espacial de los sedimentos.

Figura 16

Mapa de ubicación de calicatas



Nota. La tabla presenta el mapa temático de distribución de calicatas, facilitando la interpretación espacial del muestreo.

Resultados del análisis granulométrico

a. Distribución del tamaño de partículas:

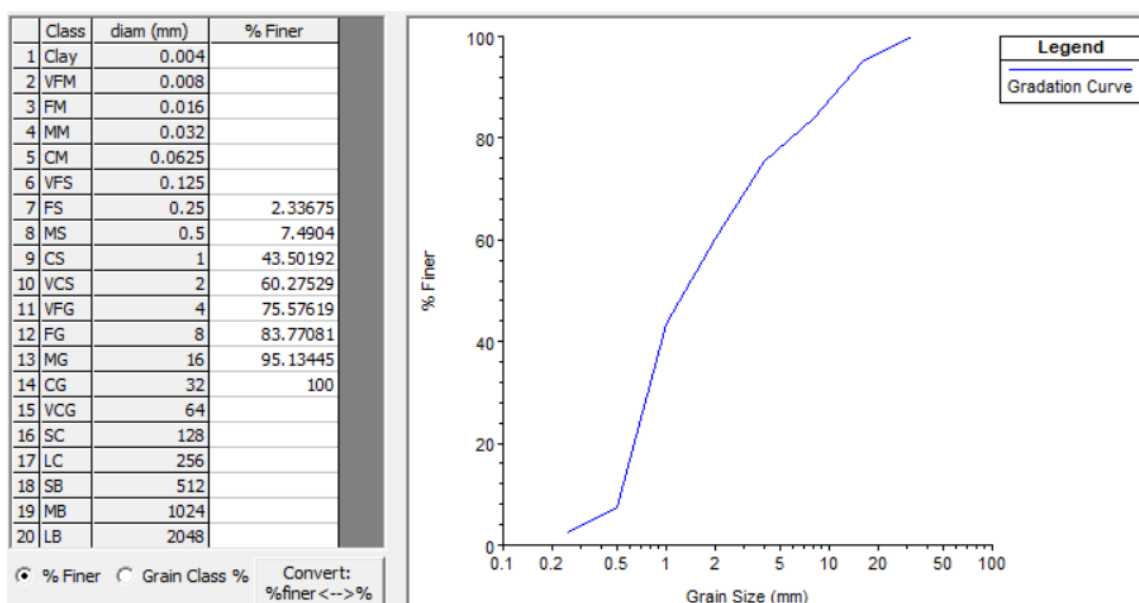
- Las calicatas ubicadas en sectores aguas arriba (por ejemplo, 1+000) mostraron una mayor proporción de partículas finas, como limo y arena, lo que indica condiciones de menor energía hidráulica.
- En las calicatas situadas aguas abajo (por ejemplo, 4+500), se observó una predominancia de partículas gruesas, como grava y cantos, asociadas a procesos de alta energía y transporte de materiales pesados.

b. Diferencias en la composición del lecho:

- El análisis evidenció una transición clara en la composición granulométrica del lecho a lo largo del río:
- **Sectores medios:** Presentan una mezcla equilibrada de sedimentos finos y gruesos.
- **Sectores finales:** Predominan las partículas gruesas debido a la deposición selectiva de materiales transportados.

Figura 17

Graduación granulométrica para la calicata N°01



Nota. La figura muestra la curva granulométrica de la calicata evaluada, relacionando tamaño de partículas y porcentaje acumulado.

Discusión de los resultados

El análisis granulométrico permitió identificar las siguientes dinámicas sedimentarias en el río Chalhuanca:

a. Zonas de acumulación:

- Los sectores con predominancia de partículas finas corresponden a áreas de menor energía hidráulica, donde los sedimentos tienden a depositarse.
- Estos tramos suelen coincidir con márgenes más anchas o con disminuciones en la pendiente del cauce.

b. Zonas de erosión:

- En los tramos con altas velocidades de flujo, los sedimentos más finos son arrastrados, dejando un lecho compuesto principalmente por grava y cantos rodados.
- Estas zonas de alta energía están asociadas con pendientes pronunciadas y angostamientos del cauce.

c. Implicancias para la modelación sedimentaria:

- La información granulométrica recopilada se utilizó para configurar las condiciones iniciales del modelo HEC-RAS en el análisis de transporte de sedimentos. En particular, se definieron parámetros como el tamaño medio de partículas (d_{50}) para cada tramo del río.

Importancia del análisis granulométrico

El análisis granulométrico es crucial para comprender la dinámica del transporte de sedimentos y su influencia en la capacidad hidráulica del río Chalhuanca. La distribución espacial de los sedimentos permite identificar las áreas más propensas a la acumulación y la erosión, lo cual es esencial para diseñar estrategias de manejo.

Además, esta información es clave para evaluar la sostenibilidad de las intervenciones hidráulicas, como dragados periódicos o la implementación de estructuras para estabilizar los márgenes del río. Los resultados obtenidos serán integrados en las simulaciones de transporte sedimentario descritas en las próximas secciones.

En conclusión, el análisis granulométrico proporciona una base sólida para entender los procesos sedimentarios en el río Chalhuanca y configurar modelos numéricos que evalúan su comportamiento bajo escenarios críticos. Las observaciones obtenidas servirán para formular medidas concretas destinadas a mejorar la gestión de este recurso fluvial.

5.1.4.2 Simulación del transporte de sedimentos

La simulación del transporte de sedimentos en el río Chalhuanca se realizó utilizando el software HEC-RAS, aprovechando su capacidad para modelar el comportamiento sedimentario bajo condiciones de flujo cuasi-permanente. Este análisis permitió identificar las áreas de mayor acumulación y erosión de sedimentos a lo largo del cauce, así como cuantificar los volúmenes involucrados. A continuación, se presenta la configuración del modelo, los resultados obtenidos y su importancia para la gestión del río.

Configuración del modelo en HEC-RAS

El modelo sedimentario se configuró utilizando los datos granulométricos y geomorfológicos del río Chalhuanca, asegurando que la simulación refleje las condiciones reales del cauce.

a. Datos de entrada:

- **Análisis granulométrico:** Los datos obtenidos de las 14 calicatas se emplearon para definir la composición del lecho. Cada tramo del río se configuró con su respectiva curva granulométrica, representando el porcentaje acumulado de sedimentos finos, medianos y gruesos.

- **Flujo constante:** Se simuló un caudal máximo de 1022.20 m³/s, correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, durante un periodo de 72 horas. Este flujo representa condiciones extremas que facilitan la evaluación de procesos de sedimentación y erosión.

Tabla 12*Resumen de análisis granulométrico*

Calica	FS_0.25m	MS_0.5m	CS_1m	VCS_2m	VFG_4m	FG_8m	MG_16m	CG_32m	EST	NORT
ta	m	m	m	m	m	m	m	m	E	E
C_01	2.3367	7.4904	43.5019	60.2753	75.5762	83.7708	95.1345	100	69031	841849
									2	0
C_02	3.3333	6.0177	25.2212	39.587	56.1652	67.0207	89.9705	100	68997	841845
									5	1
C_03	3.1121	5.5319	28.7943	39.5177	58.6879	67.766	90.6383	100	68987	841860
									1	3
C_04	2.554	6.6906	23.9568	40.3957	60.6115	78.5612	93.5252	100	68968	841864
									8	8
C_05	2.235	6.633	24.0447	38.4047	58.5148	73.5112	93.5112	100	68948	841847
									0	0
C_06	1.827	5.8256	28.8521	45.0404	55.636	75.5946	93.7608	100	68934	841876
									1	8
C_07	2.4991	7.5687	27.2403	40.6569	58.0079	78.0079	93.1457	100	68897	841882
									7	0
C_08	2.8417	7.9496	31.5468	44.6184	59.124	85.1945	93.3453	100	68883	841903
									6	5
C_09	1.5056	7.1063	29.2984	51.611	71.4243	80.548	96.0554	100	68829	841918
									1	0
C_10	1.2614	6.0159	23.5951	33.6011	50.8354	70.854	94.7556	100	68840	841916
									3	8
C_11	1.9212	7.0765	42.9395	54.2859	74.8319	83.0612	94.6526	100	68808	841948
									2	3
C_12	3.3091	5.299	24.8372	39.3724	56.0391	67.1995	90.2011	100	68757	841970
									7	6
C_13	2.315	5.5591	29.6037	43.2408	59.2073	68.362	88.36	100	68754	841995
									3	9
C_14	0.5351	13.0218	39.5648	39.5648	75.7403	90.3675	96.147	100	68696	842010
									5	2

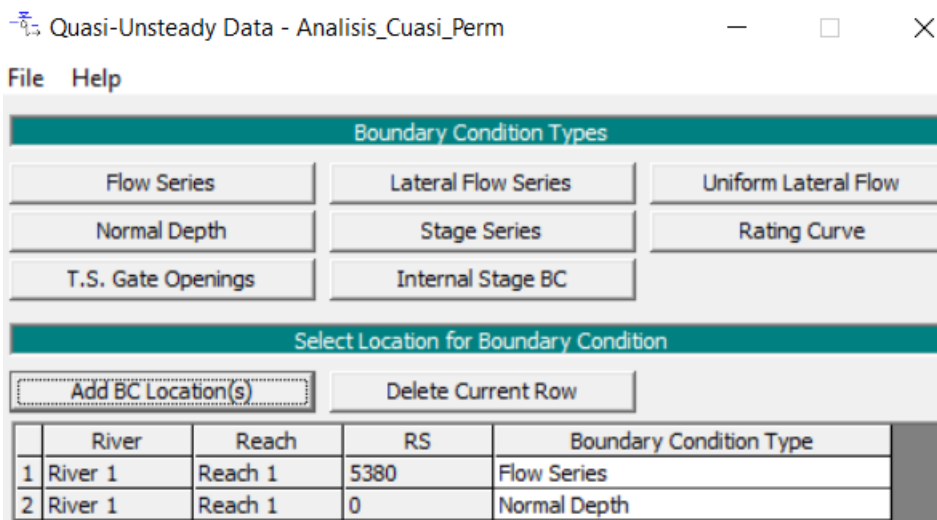
Nota. La tabla consolida los resultados granulométricos relevantes de las muestras, permitiendo comparación entre puntos del río.

b. Condiciones de contorno:

- La simulación se ejecutó bajo un esquema cuasi-permanente (Quasi-Unsteady), utilizando series de flujo que representaron el evento de avenida máxima.
- **Condiciones de entrada:** Se definió una carga sedimentaria inicial basada en el material disponible en el cauce aguas arriba.
- **Condiciones de salida:** Se estableció un balance de salida que permite la evacuación de los sedimentos acumulados durante la simulación.

Figura 18

Condiciones de contorno para la simulación



Nota. La figura presenta la configuración de condiciones de contorno usada en la simulación (entradas, salidas y control del evento).

c. Parámetros sedimentarios:

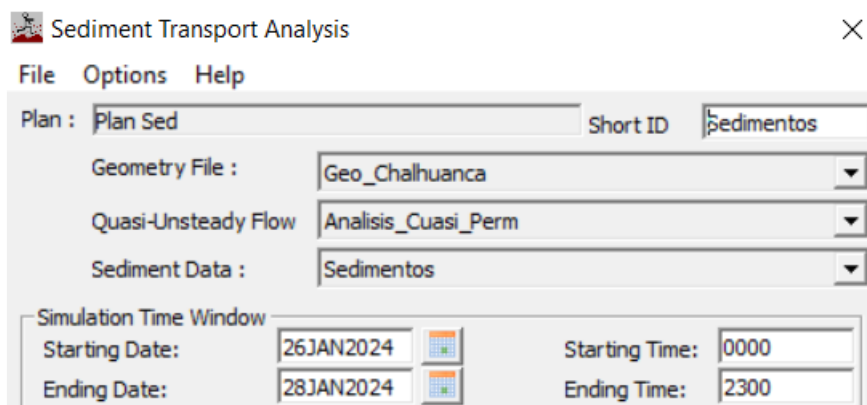
- Se aplicaron leyes de transporte de sedimentos apropiadas para condiciones fluviales, teniendo en cuenta el material granular predominante. Estas leyes permiten estimar el arrastre, la deposición y la movilidad de las partículas a lo largo del cauce.

d. Tiempo de simulación:

- La simulación se ejecutó durante un periodo de 72 horas, suficiente para analizar los procesos de transporte sedimentario bajo condiciones de caudal extremo.

Figura 19

Tiempo de simulación



Nota. La figura muestra el tiempo/duración configurada para ejecutar la simulación, asegurando la cobertura del evento completo.

Resultados de la simulación

a. Volumen de sedimentos acumulados:

- Durante el periodo de simulación, se estimó un volumen acumulado de $1.7972 \times 10^5 \text{ m}^3$ en tramos específicos del río.
- En las zonas aguas abajo, el volumen sedimentado disminuyó a $1.2032 \times 10^5 \text{ m}^3$, lo que refleja una reducción debido al transporte continuo hacia áreas con menor energía hidráulica.

Figura 20

Reporte del volumen acumulado de sedimentos

Sediment Mass/Volume budget:

River 1	Reach 1	5380	Mass In Cum	4.1740E+05 tonnes
River 1	Reach 1	5380	Vol In Cum	2.7972E+05 m ³
River 1	Reach 1	0	Mass Out Cum	1.7955E+05 tonnes
River 1	Reach 1	0	Vol Out Cum	1.2032E+05 m ³

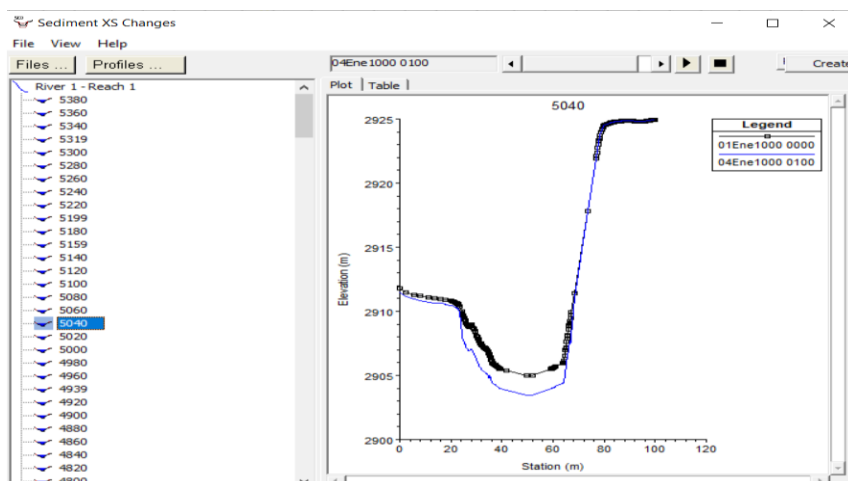
Nota. La figura presenta el volumen acumulado estimado durante la simulación, evidenciando tendencias de deposición o erosión.

b. Zonas de socavación y agradación:

- **Socavación:** Detectada en secciones como la 5+040, donde la alta energía hidráulica genera la remoción de partículas del lecho.
- **Agradación:** Identificada en secciones como la 5+199, donde las partículas gruesas se acumulan debido a una disminución en la velocidad del flujo

Figura 21

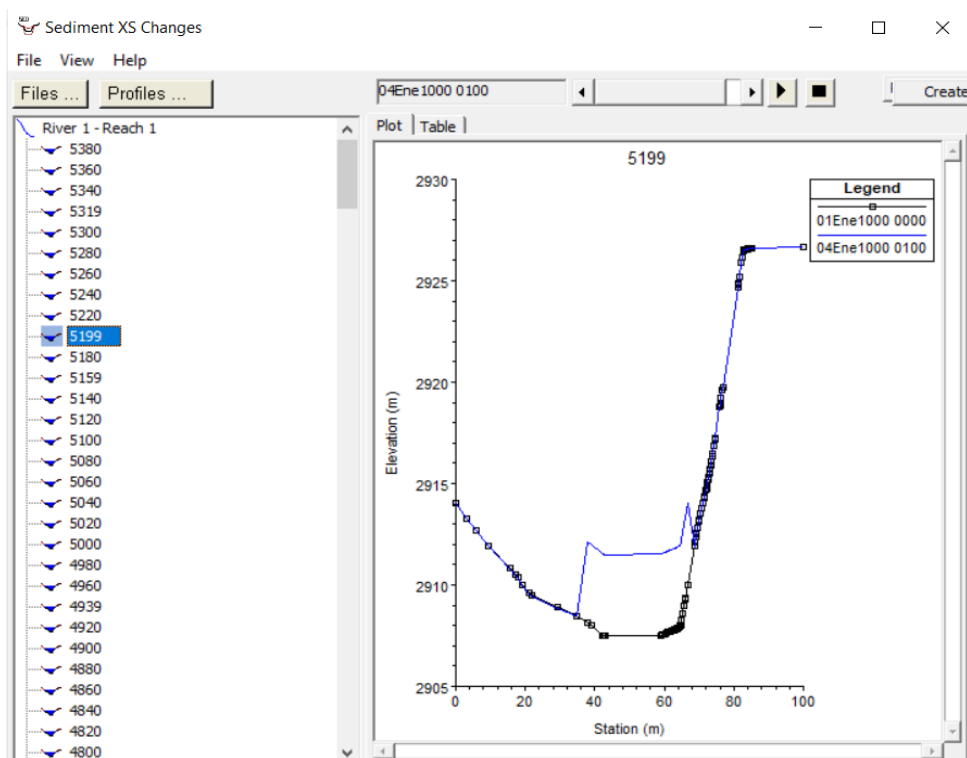
Sección 5+040 – socavación detectada



Nota. La figura evidencia una sección con socavación, asociada a concentraciones de energía y mayores velocidades locales.

Figura 22

Sección 5+199 – agradación de sedimentos



Nota. La figura muestra una sección con agradación (depósito de material), reduciendo la capacidad hidráulica del cauce.

c. Distribución de partículas:

- En las secciones superiores del río, las partículas más finas son rápidamente transportadas hacia aguas abajo.
- En las secciones medias y bajas, la disminución en la velocidad del flujo favorece la deposición de partículas más grandes, como gravas y cantos rodados

Discusión de los resultados

a. Impacto del transporte sedimentario:

- Las áreas de socavación generan un debilitamiento estructural en los márgenes del río, lo que aumenta el riesgo de deslizamientos y el colapso de infraestructuras cercanas.

- Las zonas de agradación disminuyen la capacidad hidráulica del cauce, incrementando la probabilidad de desbordes durante eventos de avenidas máximas.

b. Diferencias en el comportamiento sedimentario:

- **Aguas arriba:** Predominan los procesos de arrastre de partículas finas debido a mayores pendientes y velocidades de flujo.
- **Aguas abajo:** Se observa la deposición de partículas gruesas, asociada a la disminución de la energía hidráulica.
- **Implicancias para la gestión del río:**
- La información obtenida de la simulación es clave para diseñar estrategias de mantenimiento del cauce, como dragados periódicos en zonas de agradación y estabilización de márgenes en áreas de socavación.

Importancia de la simulación con HEC-RAS

El modelo sedimentario en HEC-RAS proporcionó una visión integral de los procesos de transporte de sedimentos en el río Chalhuanca, permitiendo:

- Identificar tramos críticos donde los sedimentos afectan negativamente la funcionalidad hidráulica del río.
- Cuantificar los volúmenes de material acumulado y erosionado, facilitando la planificación de intervenciones específicas.
- Evaluar el impacto del transporte sedimentario bajo escenarios extremos, lo cual es fundamental para la gestión sostenible del río.

En conclusión, la simulación del transporte de sedimentos con HEC-RAS confirmó la existencia de problemas significativos de agradación y socavación en el río Chalhuanca. Los resultados obtenidos serán esenciales para diseñar medidas de mitigación, como

dragados, estabilización de márgenes y monitoreos periódicos, garantizando la sostenibilidad del río y reduciendo los riesgos asociados a los procesos sedimentarios.

5.2 Discusión

5.2.1 Comparación de los resultados hidráulicos

La comparación de los resultados obtenidos mediante los modelos hidráulicos HEC-RAS e IBER permitió analizar las diferencias y similitudes en las características del flujo del río Chalhuanca. Cada modelo tiene un enfoque técnico distinto, lo que influye en cómo representan el comportamiento hidráulico del río. Este análisis destaca las fortalezas y limitaciones de cada herramienta, facilitando su integración en el diseño de estrategias para la gestión del río.

5.2.1.1 Enfoque de los modelos

a. HEC-RAS:

- Modelo unidimensional enfocado en representar el flujo en secciones transversales específicas del río.
- Ideal para identificar progresivas críticas donde ocurren desbordes, velocidades elevadas y tirantes de agua críticos.
- Facilita análisis detallados en tramos específicos, como áreas urbanas o zonas con infraestructura vulnerable.

b. IBER:

- Modelo bidimensional que proporciona una visión integral del flujo en toda la extensión del río, representando de manera continua la distribución del tirante de agua, la velocidad del flujo y las zonas inundables.
- Es especialmente útil para identificar áreas amplias de inundación y visualizar patrones complejos de flujo, como bifurcaciones o variaciones en las márgenes.

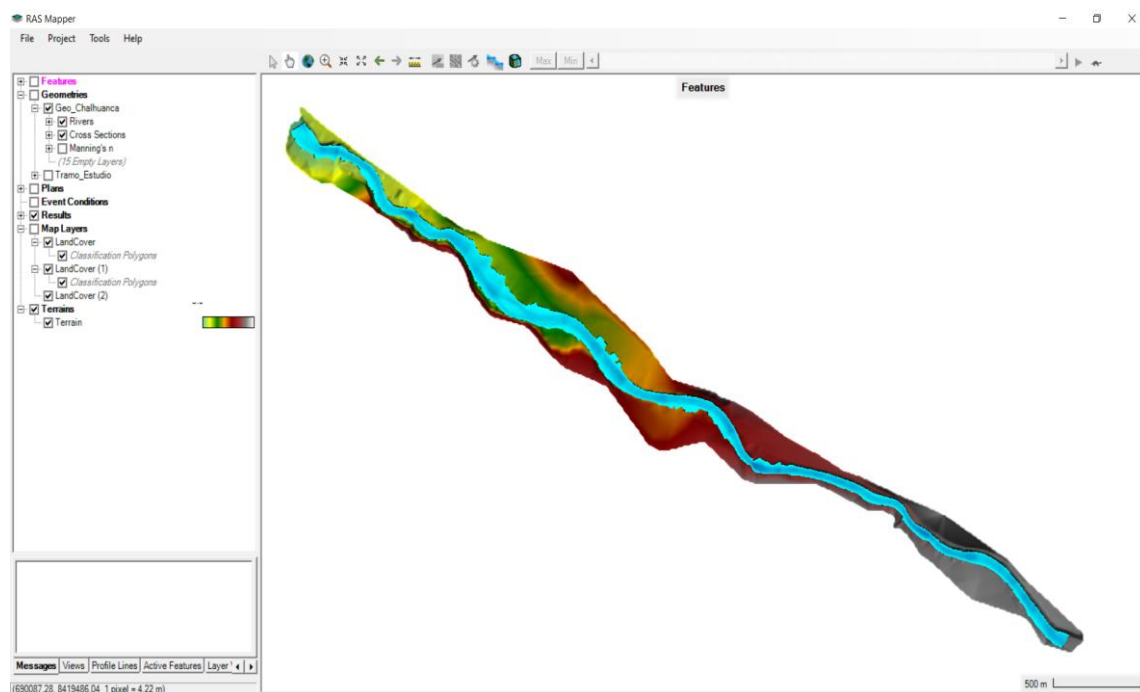
5.2.1.2 Resultados obtenidos

a. Zonas de inundación:

- **HEC-RAS:** Identificó progresivas específicas donde el cauce del río supera su capacidad hidráulica. Estas progresivas corresponden a áreas críticas como:
- **airaca:** Un punto vulnerable a inundaciones, especialmente durante eventos de caudales máximos.
- **IBER:** Generó mapas bidimensionales que muestran las áreas afectadas por inundaciones en toda la extensión del río, incluyendo áreas urbanas y agrícolas.

Figura 23

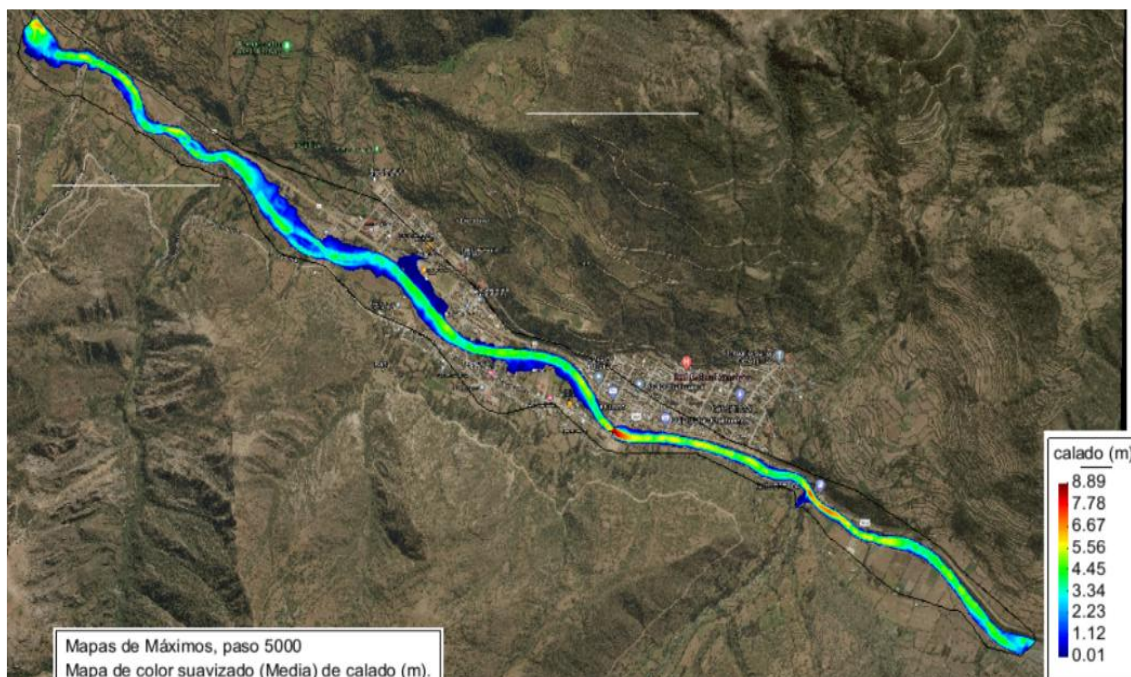
Simulación hidráulica resultado del HEC-RAS – situación actual



Nota. La figura presenta resultados del HEC-RAS para la condición actual, usada como referencia en la comparación de modelos.

Figura 24

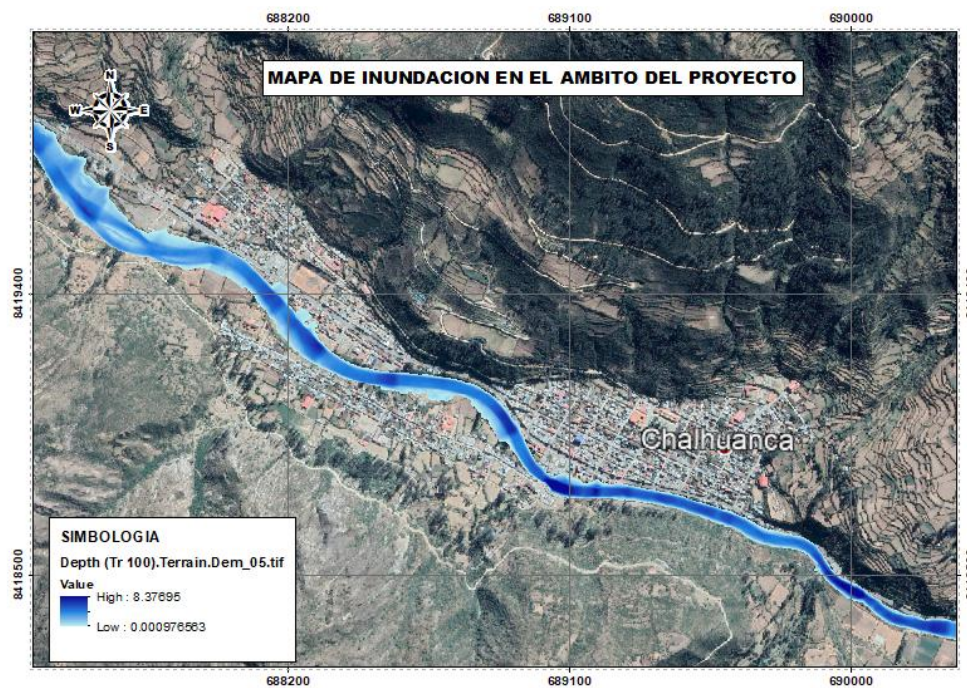
Simulación hidráulica resultado del IBER – situación actual



Nota. La figura muestra resultados del IBER para la condición actual, con representación bidimensional del flujo.

Figura 25

Mapa de inundación de toda el área de estudio



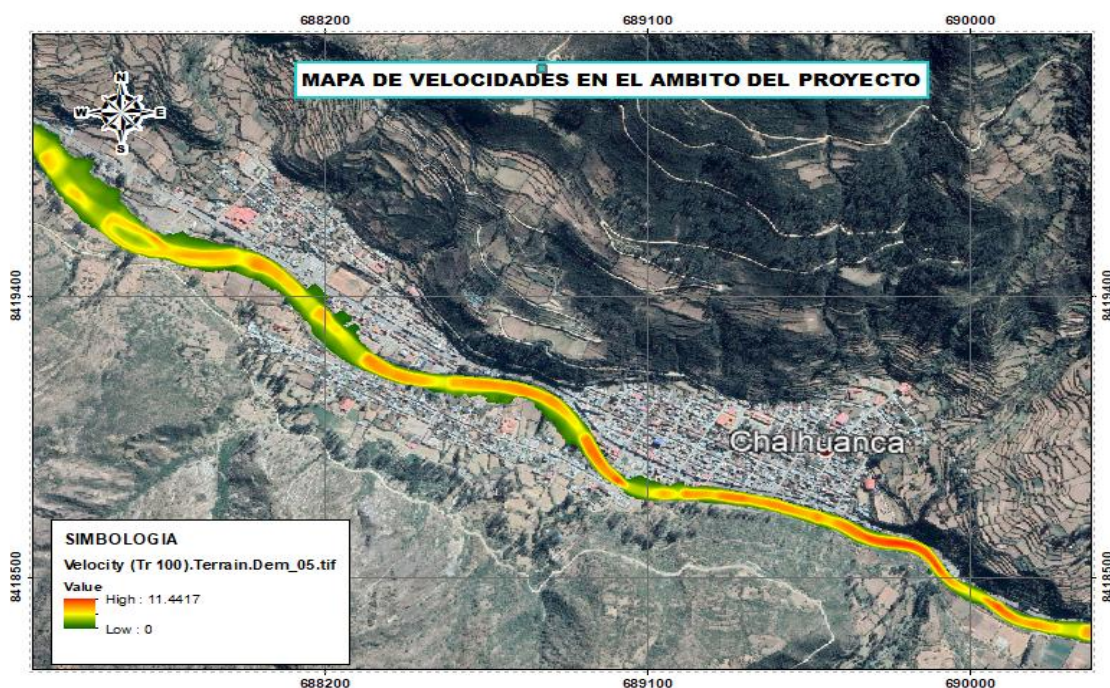
Nota. La figura delimita la inundación para el área de estudio completa, mostrando la huella de anegamiento simulada.

b. Velocidades del flujo:

- **HEC-RAS:** Ofreció una representación detallada de las velocidades en puntos específicos, identificando tramos con alta energía hidráulica, como:
- **Progresiva 4+500:** Zona con velocidades elevadas que generan riesgo de erosión.
- **IBER:** Presentó un mapa generalizado de velocidades a lo largo del río, mostrando áreas con mayor riesgo de erosión y arrastre de sedimentos.

Figura 26

Mapa de velocidades en el ámbito del área de estudio



Nota. La figura muestra la distribución de velocidades en el área de estudio, destacando tramos con mayor energía hidráulica.

Tabla 13

Coefficientes de manning asignados por tipo de suelo

Usos de Suelo	Manning
Cauce	0.035
Regadío	0.050
Secano	0.045
Pastizal y Matorral	0.050
Infraestructura	0.020
Pradera	0.050
Improductivo	0.020

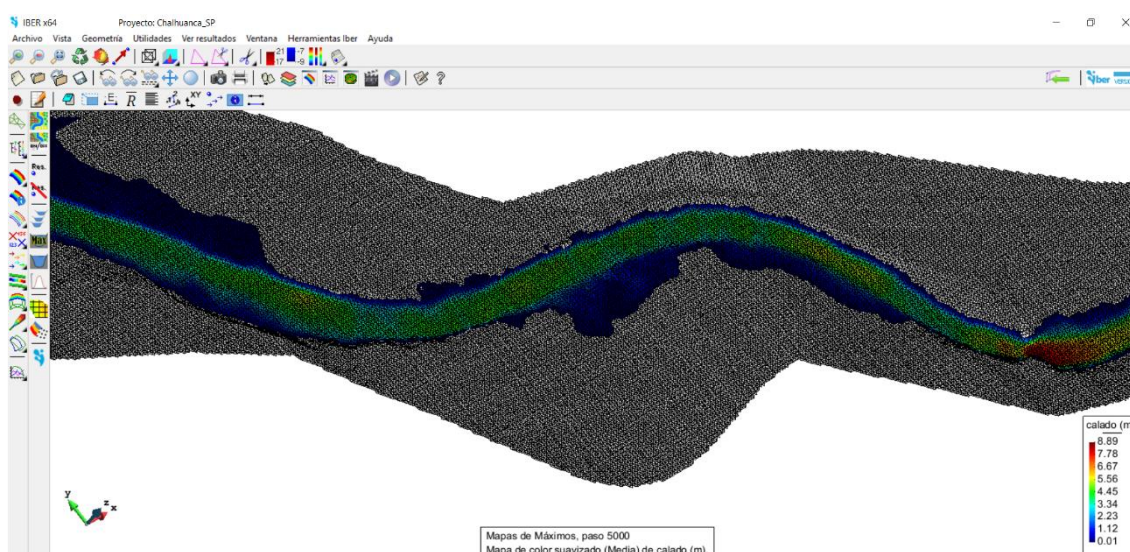
Nota. La tabla presenta los coeficientes de Manning definidos por tipo de suelo/uso del suelo para representar rugosidad.

c. Tirantes de agua:

- **HEC-RAS:** Identificó tirantes de agua críticos en progresivas específicas, destacando secciones donde el nivel del agua supera la capacidad del cauce, especialmente en sectores urbanos.
- **IBER:** Proporcionó un mapa continuo de tirantes de agua, permitiendo identificar las áreas más afectadas durante eventos de caudales máximos.

Figura 27

Vista en 2D del río Chalhuanca – tirante de agua



Nota. La figura presenta el tirante de agua en 2D para el área de estudio, evidenciando variaciones de profundidad del flujo.

5.2.1.3 Comparación de fortalezas y limitaciones

a. Fortalezas:

- **HEC-RAS:**

- Permite realizar análisis detallados en puntos específicos del cauce, como áreas urbanas o zonas con infraestructura crítica.
- Es ideal para simular flujos unidimensionales y evaluar condiciones en secciones transversales.

- **IBER:**

- Proporciona una visión bidimensional más realista de las dinámicas del flujo, mostrando patrones complejos como bifurcaciones y zonas amplias de inundación.
- Es especialmente efectivo para representar áreas rurales o zonas extensas con múltiples puntos de riesgo.

b. Limitaciones:

- **HEC-RAS:**

- Su enfoque unidimensional no captura los detalles del flujo en las márgenes del río o en áreas con geometrías complejas.

- **IBER:**

- Requiere una mayor cantidad de datos y recursos computacionales, lo que puede limitar su uso en estudios preliminares o en tramos extensos.

5.2.1.4 Discusión de las diferencias y similitudes

a. Diferencias clave:

- **HEC-RAS:** Se centra en detalles específicos y en el análisis de tramos puntuales.

- **IBER:** Proporciona una visión global de las áreas inundables y es más adecuado para estudios de planificación a gran escala, mientras que HEC-RAS es ideal para diseñar soluciones puntuales.
- **Similitudes:**
- Ambos modelos identificaron **Pairaca** y **Chalhuanca** como las zonas más vulnerables a inundaciones y desbordes.
- Los dos coinciden en señalar progresivas críticas donde el flujo excede la capacidad hidráulica del cauce.

5.2.1.5 Conclusión de la comparación

La integración de los resultados obtenidos con HEC-RAS e IBER ofrece un análisis más completo del comportamiento hidráulico del río Chalhuanca. Mientras HEC-RAS facilita el diseño de soluciones específicas en tramos críticos, IBER brinda una visión integral para la planificación de estrategias a mayor escala.

Ambos modelos coincidieron en identificar áreas críticas, lo que resalta su relevancia para el diagnóstico del río. La combinación de estos enfoques es esencial para garantizar un manejo eficiente del recurso hídrico y la seguridad de las comunidades afectadas.

5.2.2 Impacto del transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos en el río Chalhuanca tiene un impacto significativo en su dinámica hidráulica y geomorfológica. Los procesos de agradación (acumulación de sedimentos) y socavación (erosión del lecho) afectan la capacidad hidráulica del cauce, incrementando riesgos como desbordes, erosión lateral y degradación de las márgenes.

5.2.2.1 Procesos identificados en la simulación de transporte de sedimentos

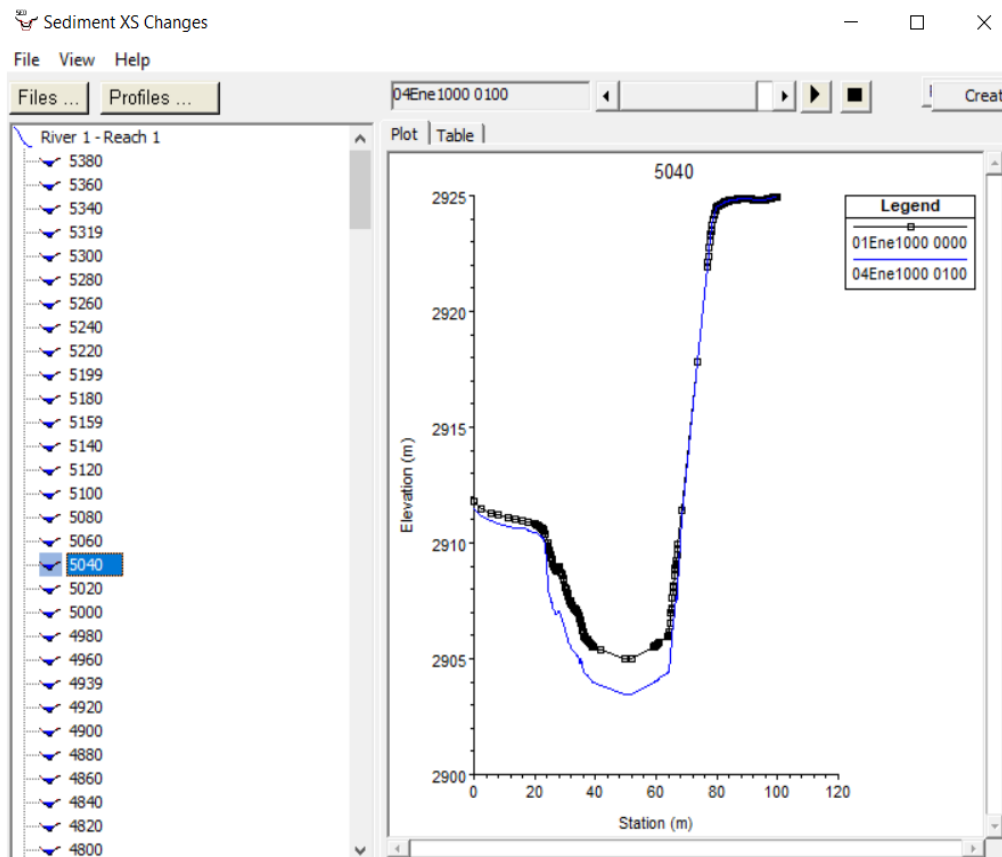
a. Socavación del lecho:

- Detectada en secciones como la **5+040**, donde las altas velocidades de flujo y la pendiente pronunciada generan erosión activa.

- La remoción del material granular incrementa la vulnerabilidad de los márgenes, provocando deslizamientos y afectando estructuras cercanas.

Figura 28

Sección 5+040 – socavación detectada



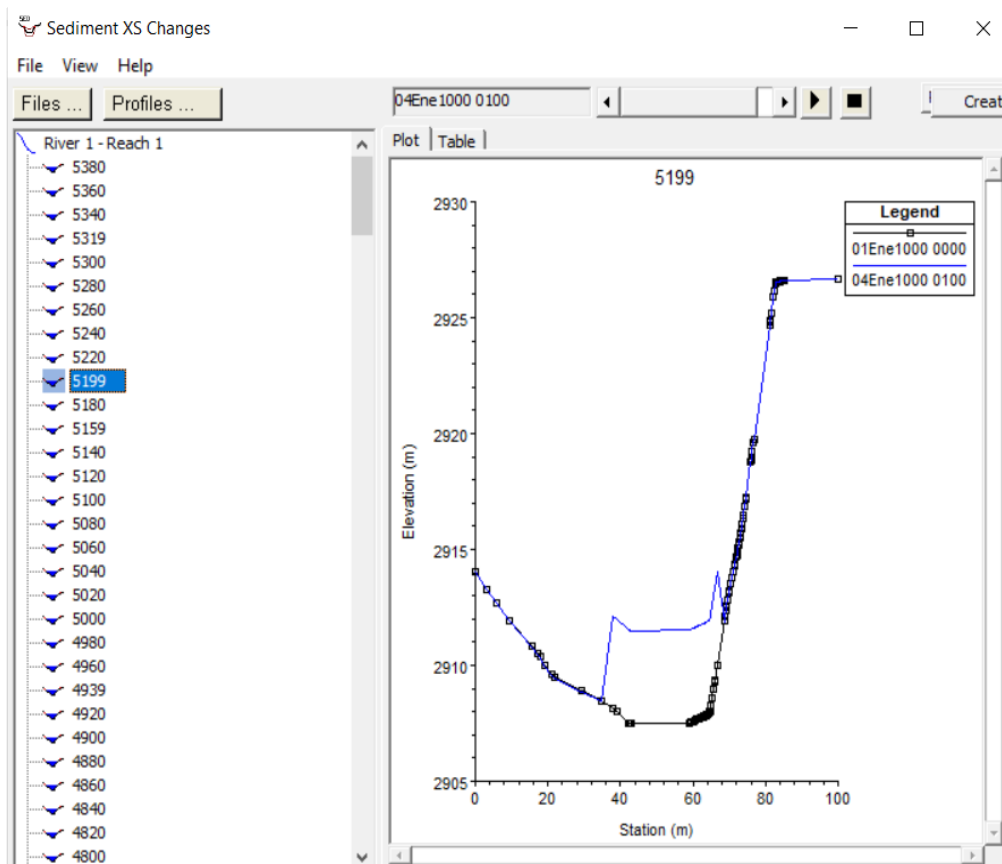
Nota. La figura confirma la presencia de socavación en la sección indicada, como punto crítico dentro del tramo evaluado.

b. Agradación de sedimentos:

- Observada en secciones como la **5+199**, donde la disminución en la velocidad del flujo favorece la deposición de partículas gruesas (grava y cantos rodados).
- Este proceso reduce la capacidad hidráulica del cauce, incrementando el riesgo de desbordes en eventos extremos.

Figura 29

Sección 5+199 – agradación de sedimentos



Nota. La figura evidencia la acumulación de sedimentos en la sección indicada, reduciendo el área hidráulica efectiva.

c. Volumen sedimentado:

- Durante el periodo de simulación (72 horas), se acumuló un volumen de **$1.7972 \times 10^5 \text{ m}^3$** en áreas de agradación.
- Aguas abajo, el volumen disminuyó a **$1.2032 \times 10^5 \text{ m}^3$** , reflejando el transporte continuo hacia zonas de menor energía hidráulica.

Figura 30

Reporte del volumen acumulado de sedimentos

Sediment Mass/Volume budget:				
River 1	Reach 1	5380	Mass In Cum	4.1740E+05 tonnes
River 1	Reach 1	5380	Vol In Cum	2.7972E+05 m ³
River 1	Reach 1	0	Mass Out Cum	1.7955E+05 tonnes
River 1	Reach 1	0	Vol Out Cum	1.2032E+05 m ³

Nota. La figura resume el volumen de sedimentos acumulado durante la simulación, mostrando el efecto de deposición por tramos.

5.2.2.2 Impacto en la capacidad hidráulica

a. Reducción de la sección hidráulica:

- En las zonas de agradación, la acumulación de sedimentos reduce la capacidad del río para evacuar caudales máximos, especialmente durante avenidas. Este fenómeno incrementa el riesgo de desbordes en áreas críticas, afectando unidades productoras, viviendas e infraestructura pública.

b. Desestabilización de márgenes:

- La socavación intensiva provoca el colapso de taludes y erosión lateral, poniendo en peligro estructuras cercanas y contribuyendo al transporte de nuevos sedimentos.

c. Alteración de la dinámica fluvial:

- Los procesos de transporte y deposición generan cambios en la morfología del río, afectando la dirección del flujo y creando zonas de alta turbulencia que agravan el desgaste del lecho.

5.2.2.3 Implicancias para la gestión del río

a. Erosión y pérdida de infraestructura:

- La socavación representa un riesgo directo para puentes, carreteras y otras estructuras cercanas.

- La degradación de las márgenes también amenaza áreas de cultivo y terrenos habitados.

b. Riesgo de inundación:

- La acumulación de sedimentos en áreas clave disminuye la capacidad del cauce, aumentando la probabilidad de desbordes durante caudales extremos.
- Sectores como **Pairaca** y **Chalhuanca** serían los más afectados.
- **Mantenimiento del cauce:**
- Los dragados periódicos son esenciales para remover sedimentos acumulados en zonas de agradación.
- Estas intervenciones deben combinarse con medidas preventivas para minimizar la generación de nuevos sedimentos.

5.2.2.4 Discusión de los hallazgos

a. Zonas críticas:

- Tanto la socavación como la agradación se concentran en tramos específicos del río, facilitando la identificación de áreas prioritarias para medidas correctivas.
- **Estrategias de mitigación:**
- **Socavación:** Se requieren defensas ribereñas y revegetación para estabilizar las márgenes y reducir la erosión lateral.
- **Agradación:** Los dragados deben complementarse con la gestión de la carga sedimentaria aguas arriba para evitar la acumulación recurrente.
- **Sostenibilidad:**
- Monitorear continuamente los procesos de transporte de sedimentos es clave para mantener la funcionalidad hidráulica del río y prevenir riesgos futuros.

5.2.2.5 Conclusión del impacto del transporte de sedimentos. El transporte de sedimentos en el río Chalhuanca afecta directamente su capacidad hidráulica, la estabilidad de las márgenes y el riesgo de desbordes. Las áreas críticas identificadas en la simulación subrayan la necesidad de un manejo integrado del cauce que combine medidas estructurales y no estructurales.

La implementación de un plan de gestión que incluya monitoreo periódico, dragados estratégicos y estabilización de márgenes garantizará un equilibrio en la dinámica fluvial del río, beneficiando tanto a las comunidades cercanas como al ecosistema en general. Los resultados de esta simulación proporcionan una base sólida para priorizar intervenciones en las zonas más vulnerables y desarrollar estrategias sostenibles a largo plazo.

VI. Conclusiones

1. Del objetivo general. La modelación hidráulica y sedimentaria permitió obtener una visión integral del comportamiento del río Chalhuanca, identificando zonas críticas de desbordes, erosión, velocidades elevadas y acumulación de sedimentos. Los resultados confirman la necesidad de intervenciones específicas para mitigar los riesgos hidráulicos y sedimentarios que afectan tanto a la infraestructura como a las comunidades cercanas. Se identificó un $Q_{max}=1022.20$ m³/s con $t=1512.00$ seg. un $Q_{final}=4.09$ m³/s con $t=7560.00$ seg., con los que se logró identificar puntos específicos con desbordes Progresiva 5+040 y velocidades peligrosas y alto riesgo de erosión 4+500.

2. Del objetivo específico 1. Los datos recopilados, como caudales máximos, topografía detallada y coeficientes de Manning, proporcionaron una base sólida para configurar y ejecutar los modelos hidráulicos y sedimentarios. Estos parámetros permitieron representar de manera precisa las condiciones actuales del río, garantizando la confiabilidad de las simulaciones.

3. Del objetivo específico 2. La simulación en HEC-RAS permitió identificar progresivas críticas, como Pairaca y Chalhuanca, donde el río supera su capacidad hidráulica durante eventos de caudales extremos (Progresiva 4+500). También se detectaron velocidades elevadas que contribuyen a la erosión de las márgenes y al riesgo de colapso de infraestructuras cercanas.

4. Del objetivo específico 3. El modelo sedimentario identificó zonas de acumulación y socavación significativas, como en las secciones 5+040 (socavación) y 5+199 (sedimentación) con un volumen acumulado de 1.7972×10^5 m³, en las zonas aguas abajo el volumen sedimentado disminuyó a 1.2032×10^5 m³. Estas dinámicas afectan la capacidad hidráulica del río, incrementando los riesgos de desbordes y deterioro de las márgenes.

VII. Recomendaciones

1. Del objetivo general. Diseñar un plan integral de manejo del río que contemple defensas ribereñas, dragados periódicos, estabilización de márgenes y monitoreos constantes, asegurando la sostenibilidad hidráulica y la protección de las comunidades vulnerables.

2. Del objetivo específico 1. Actualizar periódicamente los datos topográficos, hidrológicos y geomorfológicos del río para garantizar la precisión de futuras modelaciones. Esto incluye la medición de caudales, levantamientos topográficos y análisis granulométricos.

3. Del objetivo específico 2. Implementar defensas ribereñas en los tramos críticos identificados para proteger las áreas urbanas y agrícolas vulnerables. Adicionalmente, es necesario monitorear las velocidades del flujo en las progresivas más expuestas a la erosión y diseñar medidas de mitigación específicas.

4. Del objetivo específico 3. Realizar dragados periódicos en las zonas de acumulación para mantener la capacidad hidráulica del cauce. Además, estabilizar los márgenes en los tramos con socavación mediante la construcción de estructuras protectoras y la revegetación para reducir la erosión lateral.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes.

VIII. Referencias

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., y Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Autoridad Nacional del Agua – ANA. (s. f.). *Manual: criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos*. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/manual-disenos-1_0_2.pdf
- Autoridad Nacional del Agua. (2022). *Resolución Jefatural N.º 0365-2022-ANA: Aprueban el Plan de Gestión de Recursos Hídricos de la Cuenca Pampas*. <https://www.gob.pe/institucion/ana/normas-legales/3662230-0365-2022-ana>
- Azmeri, A., Kasury, A. R., Fadhlurrahman, M., Yulianur, A., Ziana, Z., Sundary, D., y Mutia, E. (2025). Addressing sedimentation issues: Modelling the rating curve and river sediment transport using HEC-RAS 6.1 application. *Journal of Water and Land Development*, 65, 36–44. <https://doi.org/10.24425/jwld.2025.154248>
- Basile, P. A. (2018). Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales. UNR Editora. Editorial de la Universidad Nacional de Rosario.
- Batallanos, S. C. (2023). *Análisis del comportamiento hidráulico del canal Sahuanay para la evacuación de flujo de detritos en el distrito de Tamburco, Abancay 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio Institucional UTEA <https://hdl.handle.net/20.500.14512/648>
- Bladé, E., et al. (2014). *Modelo matemático IBER para simulaciones de flujo en ríos*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 30(1), 1-10.

- Brunner, G. W. (2021). *HEC-RAS River Analysis System, User's Manual* (Version 6.0). U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Chaudhry, M. H., y Hager, W. H. (1992). *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*. Kluwer Academic. (Saltos hidráulicos y eficiencia energética)
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Contreras, M. A. (2024). *Simulación hidráulica del transporte de sedimentos en obra de control de inundaciones en el río Motupe* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/6727>
- Davila, D. (2024). *Diseño de canal de riego con máxima eficiencia hidráulica mediante el software Hec-Ras, del tramo Km 0+000 al Km 2+120, del sector Mariño región Apurímac - 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio Institucional UTEA <https://hdl.handle.net/20.500.14512/648>
- Deltares. (2020). *Modelling sand-mud interaction in Delft3D* https://publications.deltares.nl/11205286_010_0001.pdf
- Dey, S. (2014). *Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19062-9>
- DHI. (2017). *MIKE 21 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation*. Danish Hydraulic Institute.
- Esri. (2020). *ArcGIS Pro User Guide*. Environmental Systems Research Institute.
- Federal Emergency Management Agency. (2024). *General hydraulics considerations guidance*. Retrieved January 13, 2026, from https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_guidance_general_hydraulics_considerations_nov_2024.pdf

- García, M. H. (Ed.). (2008). *Sedimentation engineering: Processes, measurements, modeling, and practice*. American Society of Civil Engineers.
<https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784408148>
- García, M. H. (2008). *Sedimentation engineering: Processes, measurements, modeling, and practice*. American Society of Civil Engineers.
<https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784408148>
- Hawez, D. M., Füstös, V., Pomázi, F., Tamás, E. A., y Baranya, S. (2025). Simulation of sediment dynamics in a large floodplain of the Danube River. *Water*, 17(16), 2399.
<https://doi.org/10.3390/w17162399>
- Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1ª ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Jayo, A. (s. f.). *Diseño hidráulico de bocatoma*. Scribd. Diseño de bocatoma, caudal de avenida, estabilidad del cauce.
- Lai, Y. G. (2020). A two-dimensional depth-averaged sediment transport and morphodynamic model for unstructured grids. *Water*, 12(4), 1032.
<https://www.mdpi.com/2073-4441/12/4/1032>
- Martel, C. D. (2023). *Desarrollo de un modelo hidrodinámico bidimensional para la predicción de inundaciones fluviales en la ciudad de Tumbes – 2023* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional – Universidad de Huánuco. <https://repositorio.udh.edu.pe/20.500.14257/5308>
- Martin, F., Santillán, D., López, D., Iglesias, A., y Garrote, L. (2025). Sediment transport constraints for restoration of the Ebro Delta. *Water*, 17(11), 1620.
<https://doi.org/10.3390/w17111620>
- Mccartney, M., A Sullivan, C., y Acreman, M. (2001). Ecosystem Impacts of Large Dams.

- Ministerio de Transportes, Brasil. (2005). *Manual de hidrología básica para estructuras de drenaje*. Departamento Nacional de Infra-estructura de Transportes. http://www.ceset.unicamp.br/~hiroshiy/ST%20-%20306/Manual_Hidrologia.pdf
- Muñoz, S. A., y Hernández, D. E. (2023). *Análisis hidrodinámico comparativo de inundaciones basados en modelos Hec-Ras e Iber en el distrito Reque, cuenca río Chancay, departamento de Lambayeque* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/671481>
- National Weather Service. (s. f.). *HDSC glossary*. https://www.weather.gov/owp/hdsc_glossary
- Núñez, K. C. (2021). *Modelo hidráulico de transportes de sedimentos e influencia de los parámetros fluviales, en la confluencia de los ríos Tarma y Tulumayo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7908>
- Pizarro, J. del C. (2022). *Estudio hidrológico e hidráulico para el dimensionamiento optimizado del puente vehicular sobre la quebrada El Choclino sector Ander Becerra en el distrito de la Banda de Shilcayo – provincia de San Martín – San Martín* [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Perú]. Repositorio Institucional – Universidad Científica del Perú. <https://repositorio.ucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/2f22354e-fe1b-437c-a6e2-b2f2fd559718/content>
- Rocha, A. (1998). *Introducción a la hidráulica fluvial* (1.ª ed.). Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. <https://www.researchgate.net/profile/Arturo-Rocha-Felices->

[2/publication/315829253_Introduccion_a_la_Hidraulica_Fluvial/links/58e98284a6fdccb4a8322453/Introduccion-a-la-Hidraulica-Fluvial.pdf](https://publication/315829253_Introduccion_a_la_Hidraulica_Fluvial/links/58e98284a6fdccb4a8322453/Introduccion-a-la-Hidraulica-Fluvial.pdf)

Rocha, A. (2005). *La bocatoma*. Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.

http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/ROCHA/La_bocatoma.PDF

Ruiz, C. B. y Valenzuela, M. R. (2022). *Metodología de la investigación* (1ª ed.). Fondo Editorial, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo.

<https://fondoeditorial.unat.edu.pe/index.php/EdiUnat/catalog/view/4/5/13>

SlideShare. (s. f.). *Bocatomas* Definición de bocatoma, tipos, parámetros de diseño.

Sturm, T. W. (2001). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill.

<https://venkatasai.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/03/open-channel-hydraulics-by-terry-w-sturm-www-civilenggforall-com.pdf>

Terrones, J. E. (2024). *Estimación del gasto sólido de fondo y volumen de sedimentos acumulado en el cauce de la quebrada Calispuquio aguas arriba de la canalización del Jr. Nicolás Arriola, Cajamarca, 2024* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Cajamarca.

<https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/8734/TESIS%20-%20TERRONES%20ESTRADA%20JHONATAN.pdf?isAllowed=ysequence=1>

Tuñoque, W. A. (2024). *Riesgo cuantitativo por flujo de detritos desencadenados por precipitaciones pluviales en la microcuenca Sahuanay, Distrito de Tamburco – Abancay – Apurímac, 2023* [Tesis de grado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Repositorio Institucional UNAMBA

<http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1414>

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Hydrologic Engineering Center. (2023). *HEC-RAS 2D Sediment User Manual* (v6.4.1).

<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%202D%20Sediment%20User%20Manual-v6.4.1.pdf>

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Hydrologic Engineering Center. (s. f.). *Selecting an appropriate grid size and time step.*

<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/6.5/running-a-model-with-2d-flow-areas/selecting-an-appropriate-grid-size-and-time-step>

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2021). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual* (Version 6.0).

https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_Reference_Manual.pdf

U.S. Army Corps of Engineers. (2023). *HEC-RAS user's manual* (Version 6.4.1) [PDF].

Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%20User%27s%20Manual-v6.4.1.pdf>

U.S. Army Corps of Engineers. (s. f.). *Boundary conditions*. HEC-RAS Unsteady Flow User's Manual (v6.1). Retrieved January 13, 2026, from

<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/6.1/performing-a-1d-unsteady-flow-analysis/entering-and-editing-unsteady-flow-data/boundary-conditions>

U.S. Army Corps of Engineers. (s. f.). *Friction loss evaluation*. HEC-RAS 1D Technical Reference Manual (v6.1). Retrieved January 13, 2026, from

<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/6.1/theoretical-basis-for-one-dimensional-and-two-dimensional-hydrodynamic-calculations/1d-steady-flow-water-surface-profiles/friction-loss-evaluation>

U.S. Army Corps of Engineers. (s. f.-c). *Exner equation*. HEC-RAS 1D Sediment Transport User's Manual. Retrieved January 13, 2026, from

<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rassed1d/1d-sediment-transport-user-s-manual/sediment-transport-potential-calculation-and-discretization/exner-equation>

Walling, D. E., y Webb, B. W. (1996). Erosion and sediment yield: Global and regional perspectives. 3–19. /z-wcorg/.

Yassine, R., Cassan, L., Roux, H., Frysou, O., y Pérès, F. (2023). Numerical modelling of the evolution of a river reach with a complex morphology to help define future sustainable restoration decisions. *Earth Surface Dynamics*, 11, 1199–1221. <https://doi.org/10.5194/esurf-11-1199-2023>

Yucra, F. J. (2023). *Evaluación de riesgo por flujo de detritos y modelamiento hidrológico de la quebrada Sahuanay en el distrito de Tamburco, Abancay, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio Institucional UTEA <https://hdl.handle.net/20.500.14512/531>

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes