

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y  
CIVIL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS:**

**Desarrollo de un modelo hidrodinámico fluvial para predecir la sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui y su impacto en el canal de riego Santa Inés, provincia de Lucanas - departamento de Ayacucho**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR:

**Bach. Yuri VARGAS AVILA**

ASESOR:

**MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2025**

*Dedicado a* mis padres: Francisco, VARGAS  
QUIHUI y Donatilda, AVILA MIGUEL.

Como olvidar a mis hermanos: Arnolio,  
Efrain, Marcelina y Zósimo. Para todos ellos  
con mucho cariño y amor eterno.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, principalmente a mis padres y hermanos, pues han tenido que tolerar todo de mi persona, me han brindado todo su apoyo incondicional absorbiendo las dificultades que encontré en mi trayecto, ellos son los pilares con los que se inició la construcción de este trabajo.

Agradezco a los amigos como que siempre fueron los más cercanos que llevamos mucho tiempo de conocernos, quienes formaron el parte del trayecto con su apoyo y ánimo incondicional tanto en buenos y malos momentos, haciéndome entender que son parte de mi familia.

De mano, agradezco a mis hermanos: Arnolio, Efraín y Marcelina que también formaron una parte muy importante para seguir en mi formación profesional, de la misma manera agradecer de todo corazón al Royer Palomino Molina por el gran ayuda y mi sobrino Rodil Laurente Huachaca, por otra parte como olvidar a los docentes que tuve a lo largo de mi formación profesional, sus conocimientos y apoyo son el medio valioso con el cual ahora puedo seguir el recorrido en campo de ingeniería como también un agradecimiento en especial al docente que me apoyó durante el trayecto de este trabajo: el Ing. Jaime BENDEZÚ PRADO que siempre me recibió con entusiasmo sin negarse, siempre encontró un espacio para atenderme y resolver todas mis dudas por más simple que era y sin importar cuánto trabajo tuviera.

A todos ellos y como también a Lucy Mary y los demás personas que siempre estuvieron presentes en mi vida con ciertas ayudas para salir adelante, les estaré eternamente agradecido.

## RESUMEN

La cuenca del río Huallamalqui, localizada en la provincia de Lucanas, Ayacucho, enfrenta problemas significativos de sedimentación y erosión que afectan la eficiencia y sostenibilidad del Canal de Riego Santa Inés. Estas dinámicas fluviales impactan negativamente la distribución del recurso hídrico y generan costos adicionales en mantenimiento, lo que subraya la necesidad de un análisis técnico detallado. El objetivo principal fue desarrollar un modelo hidrodinámico que permita simular los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca y evaluar su impacto en el canal. Para ello, se recopilieron datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos, y se implementó un modelo que considera variables como caudales, pendientes y velocidades críticas. Los resultados evidencian que las velocidades elevadas en la cabecera del río, superiores a  $6m/s$ , intensifican la erosión, mientras que en las zonas de baja pendiente se acumulan sedimentos, alcanzando hasta  $27,57ton/m^2$  en 5 años. Las conclusiones resaltan que los procesos de sedimentación y erosión disminuyen la capacidad hidráulica del canal y afectan su sostenibilidad. Se identificaron zonas críticas que requieren monitoreo constante y estrategias de mitigación, como trampas de sedimentos y reforestación en la cuenca. El modelo hidrodinámico desarrollado es una herramienta fundamental para la gestión eficiente de recursos hídricos y para la planificación de intervenciones que aseguren la funcionalidad del Canal de Riego Santa Inés frente a los desafíos ambientales y climáticos actuales.

**Palabras Claves:** Canal de riego, Dinámica fluvial, Erosión, Modelo hidrodinámico, Sedimentación.

## ABSTRACT

The Huallamalqui river basin, located in the province of Lucanas, Ayacucho, faces significant sedimentation and erosion problems that affect the efficiency and sustainability of the Santa Inés Irrigation Canal. These fluvial dynamics negatively impact the distribution of water resources and generate additional maintenance costs, which underlines the need for a detailed technical analysis. The main objective was to develop a hydrodynamic model to simulate sedimentation and erosion processes in the basin and evaluate their impact on the channel. To this end, hydrological, topographical and sedimentological data were collected, and a model was implemented that considers variables such as flow rates, slopes and critical velocities. The results show that high velocities in the headwaters of the river, above  $6m/s$ , intensify erosion, while sediment accumulates in the low slope areas, reaching up to  $27,57ton/m^2$  in 5 years. The conclusions highlight that sedimentation and erosion processes reduce the hydraulic capacity of the channel and affect its sustainability. Critical areas were identified that require constant monitoring and mitigation strategies, such as sediment traps and reforestation in the watershed. The hydrodynamic model developed is a fundamental tool for the efficient management of water resources and for the planning of interventions to ensure the functionality of the Santa Inés Irrigation Canal in the face of current environmental and climatic challenges.

**Keywords:** Irrigation canal, Fluvial dynamics, Erosion, Hydrodynamic model, Sedimentation.

# Índice

<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción del Problema . . . . .	1
1.2. Delimitación del Problema . . . . .	3
1.2.1. <i>Espacial (Geográfica).</i> . . . . .	3
1.2.2. <i>Temática y Unidad de Análisis.</i> . . . . .	3
1.3. Formulación del problema . . . . .	4
1.3.1. <i>Problema general.</i> . . . . .	4
1.3.2. <i>Problemas específicos</i> . . . . .	4
1.4. Justificación e importancia . . . . .	4
1.4.1. <i>Justificación</i> . . . . .	4
1.4.2. <i>Importancia</i> . . . . .	5
1.5. Limitaciones de la investigación . . . . .	6
1.6. Objetivos . . . . .	7
1.6.1. <i>Objetivo general</i> . . . . .	7
1.6.2. <i>Objetivos específicos</i> . . . . .	8
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	8
2.1.1. <i>Investigaciones internacionales</i> . . . . .	8
2.1.2. <i>Investigaciones nacionales</i> . . . . .	10
2.2. Bases teóricas. . . . .	11
2.2.1. <i>Cuenca hidrográfica.</i> . . . . .	11
2.2.2. <i>Transformación de Lluvia en Escurrimiento</i> . . . . .	15
2.2.3. <i>Hidráulica Fluvial</i> . . . . .	18
2.2.4. <i>Métodos para describir el flujo de fluidos</i> . . . . .	21
2.2.5. <i>Fuerzas en un Elemento de Fluido</i> . . . . .	22
2.2.6. <i>Ecuaciones de Flujo de Fluidos</i> . . . . .	22
2.2.7. <i>Propiedades de los Sedimentos</i> . . . . .	24

2.2.8.	<i>Suelos Cohesivos</i>	26
2.2.9.	<i>Erosión Hidráulica</i>	28
2.3.	Marco Conceptual.	29
2.3.1.	<i>Topografía</i>	29
2.3.2.	<i>Hidrología</i>	30
2.3.3.	<i>Intensidad de lluvias</i>	30
2.3.4.	<i>Hidráulica</i>	31
2.3.5.	<i>Caudal</i>	31
2.3.6.	<i>Clasificación de suelos</i>	31
2.3.7.	<i>Hidrodinámica</i>	32
2.3.8.	<i>Río</i>	32
2.3.9.	<i>Meandro</i>	33
2.3.10.	<i>Socavación</i>	33
2.3.11.	<i>Sistema fluvial</i>	34
<b>3.</b>	<b>MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>34</b>
3.1.	Enfoque	34
3.2.	Alcance	35
3.3.	Diseño de investigación	35
3.4.	Población y muestra	36
3.4.1.	<i>Población</i>	36
3.4.2.	<i>Muestra</i>	36
3.5.	Hipótesis	36
3.5.1.	<i>Hipótesis general</i>	36
3.5.2.	<i>Hipótesis específicas</i>	36
3.6.	Operacionalización de variables	37
3.7.	Técnicas e instrumentos	40
3.7.1.	<i>Técnicas</i>	40
3.7.2.	<i>Instrumentos</i>	40
3.8.	Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información	40

3.9. Desarrollo del Trabajo de Tesis . . . . .	42
3.9.1. <i>Datos Topográficos</i> . . . . .	42
3.9.2. <i>Característica de la cuenca del Rio Huallamalqui</i> . . . . .	42
3.9.3. <i>Parámetros geomorfológicos de la cuenca</i> . . . . .	44
3.9.4. <i>Datos Hidrológicos</i> . . . . .	47
3.9.5. <i>Datos sedimentológicos</i> . . . . .	65
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>68</b>
4.1. Análisis e interpretación de resultados . . . . .	68
4.1.1. <i>Modelo hidrodinámico</i> . . . . .	68
4.1.2. <i>Escenarios de Sedimentación y Erosión</i> . . . . .	87
4.1.3. <i>Impacto de sedimentación en el canal de Riego Santa Inés</i>	95
4.1.4. <i>Impacto de erosión en el canal de Riego Santa Inés</i> . . . .	97
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>99</b>
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	<b>100</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>102</b>
<b>8. ANEXO.</b>	<b>105</b>

## Índice de tablas

1.	Valores Interpretativos del Factor de Forma. . . . .	13
2.	Cuadro de Operacionalización de variables . . . . .	38
3.	Parámetros de la cuenca del río Huallamalqui. . . . .	47
4.	Precipitación mensual generada en la cuenca rio Huallamalqui . . . . .	49
5.	Caudal Disponible en la Fuente - Río Huallamalqui. . . . .	57
6.	Cédula del cultivo. . . . .	59
7.	Parámetros de Evapotranspiración y requerimientos hídricos mensuales por mes. . . . .	60
8.	Resumen mensual de precipitaciones, pérdidas y necesidades hídricas. . .	62
9.	Demanda Mensual de Agua Bruta por Hectárea y Total. . . . .	64
10.	Datos de Sedimentación. . . . .	66

## Índice de figuras

1.	Clasificación de la cuenca por su elevación . . . . .	12
2.	Curva hipsométrica . . . . .	14
3.	Ciclo hidrológico . . . . .	15
4.	Hidrograma triangular . . . . .	17
5.	Hidrograma Adimensional . . . . .	18
6.	Perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un río . . . . .	19
7.	Curvas hipsométricas obtenidas del Caso Vertiente del Pacífico Peruano .	20
8.	Componentes del esfuerzo viscoso en un volumen de control . . . . .	22
9.	Entrada y salida de masa de flujo . . . . .	23
10.	Fuerzas superficiales en una partícula de fluido . . . . .	24
11.	Curva granulométrica . . . . .	26
12.	Diagrama de Shields . . . . .	27
13.	Erosión local . . . . .	28
14.	Vista satelital de la cuenca . . . . .	45
15.	Punto de aforo de la cuenca . . . . .	45
16.	Área y perímetro de la cuenca . . . . .	46
17.	Parámetros morfométricas de la cuenca . . . . .	46
18.	Precipitación mensual generada . . . . .	51
19.	Variación de la Precipitación . . . . .	52
20.	Descargas medias mensuales . . . . .	55
21.	Variación mensual de caudales . . . . .	70
22.	Perfil Longitudinal del Río Huallamalqui . . . . .	72
23.	Velocidades críticas de sedimentación y erosión . . . . .	74
24.	Evolución de la velocidad en el Río Huallamalqui . . . . .	78
25.	Sedimentación acumulada (ton) . . . . .	83
26.	Velocidad del agua en tramos . . . . .	84
27.	Evolución de la sedimentación por tramos . . . . .	85

28.	Resultados de la proyección de sedimentación . . . . .	86
29.	Acumulación y erosión por escenarios . . . . .	89
30.	Acumulación y erosión en el tramo medio . . . . .	91
31.	Velocidad promedios por tramo final . . . . .	93

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui y su impacto en el Canal de Riego Santa Inés, en la provincia de Lucanas, Ayacucho. Estos fenómenos representan desafíos significativos para la sostenibilidad del sistema de riego, afectando tanto su eficiencia hidráulica como su funcionalidad a largo plazo. La acumulación de sedimentos reduce la capacidad del canal, mientras que la erosión compromete su estabilidad estructural. Estos problemas, exacerbados por variaciones climáticas y geomorfológicas, no solo incrementan los costos de mantenimiento, sino que también limitan el acceso al recurso hídrico, impactando la productividad agrícola de la región.

El estudio se desarrolla con el objetivo de analizar y predecir la dinámica fluvial en la cuenca mediante la implementación de un modelo hidrodinámico. Este modelo está diseñado para simular procesos críticos de sedimentación y erosión, identificar zonas vulnerables y evaluar su impacto en la operatividad del canal. La investigación considera la interacción entre las características geomorfológicas del río, los patrones hidrológicos y los escenarios de flujo, proporcionando una comprensión integral de los problemas existentes y las posibles soluciones.

El método empleado combina la recopilación de datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos con la simulación numérica. Inicialmente, se caracteriza la cuenca del río mediante el análisis de parámetros clave como la pendiente, la densidad de drenaje y los caudales promedio, utilizando herramientas de programación en Python y datos históricos. Posteriormente, se desarrolla y calibra un modelo hidrodinámico que simula la evolución del flujo en diferentes escenarios, desde flujos lentos con alta sedimentación hasta flujos extremos con erosión crítica. Este enfoque permite evaluar el balance sedimentológico, las tasas de erosión y las dinámicas fluviales a lo largo del sistema. El modelo hidrodinámico no solo permite comprender los procesos actuales, sino que también ofrece una herramienta predictiva para la gestión y planificación del recurso hídrico. Los resul-

tados obtenidos proporcionan información valiosa para diseñar estrategias de mitigación, como el control de sedimentos, la reforestación y el mantenimiento preventivo del canal, contribuyendo a la sostenibilidad de este recurso vital para la región.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción del Problema**

La situación hídrica global se encuentra en un punto crítico, exacerbado por el cambio climático y una demanda creciente de recursos hídricos. La persistente sequía de los últimos cuatro años ilustra cómo el cambio climático está afectando a uno de los recursos más vitales: el agua. De cara al 2050, se espera que la demanda mundial de agua aumente en un 40 %, lo que requerirá una optimización significativa del uso de este recurso, así como la modernización y mejora de las estrategias de manejo del agua. Esto incluye una mayor digitalización del sector, con una financiación estimada que oscila entre los 200.000 y 600.000 millones de euros, según las últimas conclusiones de la Conferencia Mundial del Agua de las Naciones Unidas (Martín, 2023). Actualmente, el 72 % de toda el agua dulce extraída globalmente se destina al sector agrícola. Es notable cómo la agricultura de secano, que representa el 80 % de las tierras cultivadas, produce el 60 % de los alimentos globales, mientras que el regadío, que ocupa solo el 20 % de la tierra, genera el 40 % de la producción alimentaria gracias a su mayor productividad. El área regada global ha aumentado significativamente, reflejando la creciente importancia del regadío en la seguridad alimentaria mundial (Martín, 2023).

La digitalización del sector del agua, apoyada por iniciativas como el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de la Unión Europea, incluye la implementación de tecnologías avanzadas como la teledetección y los sistemas de información geográfica. Estas tecnologías pueden jugar un papel crucial en el monitoreo de la dinámica fluvial,

permitiendo una mejor predicción y manejo de la sedimentación y la erosión. A través de la teledetección, es posible obtener datos precisos sobre la humedad del suelo, los patrones de flujo del agua y la acumulación de sedimentos, facilitando una gestión más eficiente y proactiva del agua. Además, los modelos de hidráulica fluvial mejoran la comprensión y predicción de caudales, niveles y velocidades de flujo, esenciales para el diseño óptimo de infraestructuras fluviales, captaciones y concesiones. El análisis de transporte de sedimentos, así como los estudios de erosión y sedimentación, son vitales para anticipar cambios en los ríos, jugar un papel crucial en el control de inundaciones, la protección contra avenidas y el diseño de diques y estructuras resistentes a la erosión (IDRICA, 2024).

En el contexto de cambio climático y escasez hídrica, se observa una necesidad urgente de entender y gestionar mejor la dinámica fluvial en cuencas como la del Río Huallamalqui. La cuenca de este río es crucial para la agricultura de la región, especialmente para el Canal de Riego Santa Inés, que soporta una considerable carga agrícola. El estudio de la dinámica fluvial, la predicción de la sedimentación y la erosión son fundamentales para mantener la eficacia y sostenibilidad de este canal de riego. La sedimentación y la erosión son procesos naturales que pueden tener impactos significativos en la eficiencia de los canales de riego. La sedimentación puede reducir la capacidad del canal, limitando el flujo de agua necesaria para la agricultura, mientras que la erosión puede comprometer la integridad estructural del canal, causando pérdidas de agua y reduciendo la eficiencia del riego. La comprensión de estos procesos en la cuenca del Río Huallamalqui es esencial para implementar estrategias que mitiguen estos efectos y optimicen el uso del agua en la región.

El estudio y manejo de la dinámica fluvial en la cuenca del Río Huallamalqui no solo es crucial para la sostenibilidad del canal de riego Santa Inés, sino también para la economía local y la seguridad alimentaria de la región, ya que los agricultores dependen del agua

para cultivar productos esenciales como la papa, el trigo, la cebada y el maíz, entre otros (Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco, 2020). La optimización del canal mediante una mejor comprensión y gestión de la sedimentación y la erosión puede resultar en una mayor producción agrícola y, por ende, en mejores ingresos para los agricultores. A medida que avanzamos hacia un futuro marcado por desafíos hídricos y climáticos, la combinación de esfuerzos globales con soluciones localizadas será esencial para asegurar la resiliencia y sostenibilidad de nuestras comunidades rurales. El manejo efectivo de la dinámica fluvial en cuencas como la del Río Huallamalqui es un ejemplo de cómo las intervenciones basadas en la ciencia y la tecnología pueden ayudar a mitigar los efectos del cambio climático y gestionar de manera sostenible los recursos hídricos.

## **1.2. Delimitación del Problema**

### **1.2.1. *Espacial (Geográfica).***

La delimitación espacial de esta investigación se centra en la cuenca del Río Huallamalqui, específicamente en el tramo que impacta el Canal de Riego Santa Inés. Esta área está ubicada dentro de la Provincia de Lucanas en el Departamento de Ayacucho.

### **1.2.2. *Temática y Unidad de Análisis.***

La delimitación temática se enfoca en el desarrollo y aplicación de un modelo hidrodinámico para analizar la dinámica fluvial del Río Huallamalqui. La investigación examinará específicamente los procesos de sedimentación y erosión dentro de la cuenca y cómo estos afectan la eficiencia y sostenibilidad del Canal de Riego Santa Inés.

La unidad de análisis será el comportamiento hidrológico y sedimentológico del río, modelado a través de simulaciones que predicen cambios en la sedimentación y la erosión, así como su impacto directo en las infraestructuras de riego y la agricultura local.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. *Problema general.***

¿Cómo puede un modelo hidrodinámico de dinámica fluvial ser desarrollado y utilizado para analizar y predecir los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui, y evaluar su impacto en el Canal de Riego Santa Inés en la Provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho?

#### **1.3.2. *Problemas específicos***

1. ¿Qué métodos y técnicas se deben emplear para recopilar y analizar de manera efectiva los datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos de la cuenca del Río Huallamalqui y del Canal de Riego Santa Inés para asegurar una base de datos precisa y completa?
2. ¿Cómo se puede desarrollar y calibrar un modelo hidrodinámico que simule adecuadamente la dinámica fluvial del Río Huallamalqui, incorporando los procesos de sedimentación y erosión?
3. ¿De qué manera se puede evaluar el impacto de los procesos de sedimentación y erosión en la eficiencia y sostenibilidad del Canal de Riego Santa Inés, utilizando el modelo hidrodinámico desarrollado.?

### **1.4. Justificación e importancia**

#### **1.4.1. *Justificación***

Esta investigación es esencial debido a la importancia crítica de gestionar y preservar los recursos hídricos en regiones afectadas por fenómenos naturales adversos, como la sedimentación y la erosión, que amenazan la sostenibilidad de las infraestructuras

agrícolas y el bienestar de las comunidades locales. El río Huallamalqui y el Canal de Riego Santa Inés, ubicados en la provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho, desempeñan un papel vital en la agricultura de la región, un sector que no solo es un pilar económico sino también esencial para la seguridad alimentaria local.

La cuenca del río Huallamalqui ha experimentado cambios significativos en sus patrones de flujo y sedimentación, lo que ha impactado directamente la eficiencia del canal de riego Santa Inés, reduciendo su capacidad para distribuir agua de manera efectiva. Esta situación pone en riesgo la productividad agrícola, especialmente en tiempos de sequía o fluctuaciones climáticas extremas. Además, los eventos de erosión pueden deteriorar la infraestructura del canal, aumentando los costos de mantenimiento y reparación. Es por ello que el desarrollo de un modelo hidrodinámico permitirá una comprensión profunda de estos procesos, ofreciendo una herramienta invaluable para predecir y mitigar los efectos de la sedimentación y erosión. A través de la simulación y análisis de diferentes escenarios, este modelo facilitará la toma de decisiones informadas para la gestión y planificación de recursos hídricos, garantizando la optimización del uso del agua y la protección de las infraestructuras esenciales. Esta investigación no solo busca ofrecer soluciones prácticas y técnicas a problemas inmediatos, sino también contribuir a la resiliencia y sostenibilidad a largo plazo de la región, mejorando la vida de sus habitantes y asegurando la conservación de su entorno natural.

#### **1.4.2. *Importancia***

La importancia de esta investigación radica en su potencial para influir significativamente en la gestión sostenible de los recursos hídricos en una región afectada por cambios en sus dinámicas fluviales. Al desarrollar un modelo hidrodinámico que analice y prediga los procesos de sedimentación y erosión, se puede lograr un manejo más efectivo del agua, crucial para la agricultura y la vida diaria en la provincia de Lucanas.

Primero, el modelo ayudará a prevenir el deterioro de la infraestructura hidráulica, como el Canal de Riego Santa Inés, al identificar áreas vulnerables a la erosión y lugares donde la sedimentación puede reducir la capacidad del canal. Esto es vital para reducir los costos operativos y de mantenimiento, y para mantener la eficiencia del canal en el transporte de agua.

Segundo, este estudio proporciona una base científica para la planificación y ejecución de políticas de conservación del suelo y del agua. Las simulaciones de escenarios futuros permitirán a los planificadores y gestores de recursos adaptar sus estrategias a las condiciones cambiantes, mejorando la resiliencia de la comunidad ante el cambio climático y otros desafíos ambientales.

Tercero, al asegurar un suministro de agua más confiable y gestionado eficazmente, la investigación apoya directamente la seguridad alimentaria local. Esto es especialmente crítico en una región donde la agricultura constituye una parte importante de la economía local y el sustento de muchas comunidades.

Finalmente, al compartir los hallazgos y metodologías desarrolladas a través de esta investigación, se puede fomentar la adopción de prácticas similares en otras regiones con desafíos comparables. Esto amplía el impacto del estudio más allá de sus límites geográficos, contribuyendo al conocimiento global sobre la gestión de cuencas fluviales y la mitigación de los impactos del cambio ambiental sobre las infraestructuras críticas y los ecosistemas.

## **1.5. Limitaciones de la investigación**

- La precisión y eficacia del modelo hidrodinámico dependen críticamente de la disponibilidad y calidad de los datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos. La

falta de datos históricos completos o precisos puede limitar la calibración y validación del modelo, afectando la confiabilidad de las simulaciones y predicciones.

- Los procesos de sedimentación y erosión son influenciados por una multitud de factores ambientales y antropogénicos, lo que los hace intrínsecamente complejos y a veces impredecibles. Esta complejidad puede no ser completamente capturada por los modelos hidrodinámicos, especialmente en condiciones extremas o bajo escenarios de cambio climático rápido.
- Los resultados obtenidos pueden no ser generalizables a otras cuencas con diferentes características hidrológicas, geológicas o climáticas. Esto limita la aplicabilidad de los hallazgos a otras regiones sin adaptaciones o calibraciones adicionales.
- Aunque el modelo puede simular escenarios basados en datos históricos, predecir cómo el cambio climático alterará exactamente los patrones de precipitación, caudales de ríos y procesos de erosión y sedimentación en el futuro es extremadamente desafiante. Estas incertidumbres pueden afectar la capacidad del modelo para hacer predicciones a largo plazo con alta precisión.

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. *Objetivo general***

Desarrollar un modelo hidrodinámico de dinámica fluvial para analizar y predecir los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui, y evaluar su impacto en el Canal de Riego Santa Inés en la Provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho.

### 1.6.2. *Objetivos específicos*

- Recopilar y analizar datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos de la cuenca del Río Huallamalqui y del Canal de Riego Santa Inés.
- Desarrollar y calibrar un modelo hidrodinámico que simule la dinámica fluvial del Río Huallamalqui, incluyendo los procesos de sedimentación y erosión.
- Evaluar el impacto de los procesos de sedimentación y erosión en la eficiencia y sostenibilidad del Canal de Riego Santa Inés mediante simulaciones del modelo hidrodinámico.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. *Investigaciones internacionales*

Díaz (2024) en su investigación “*Análisis de la dinámica fluvial del río Guamal con el fin de valorar y proponer obras de mitigación de las inundaciones para el municipio de Guamal, departamento del Meta*”, tuvo como objetivo proponer y evaluar soluciones para mitigar las inundaciones del río Guamal en un sector cercano al casco urbano del municipio de Guamal. Se utilizó una metodología basada en el análisis del comportamiento hidráulico del río, enfocándose en la estimación de parámetros geomorfológicos, hidrológicos y fluviales. Se empleó el modelo hidráulico bidimensional IBER para evaluar las condiciones hidrodinámicas. Los resultados revelaron que los desbordamientos se deben a la configuración de cauce trenzado y la alta carga de sedimentos. Se realizó un análisis multicriterio de diversas alternativas de mitigación y se determinó que la construcción de un dique longitudinal con material artificial es la mejor opción para reducir las inundaciones en la zona de estudio.

González et al. (2022) en su artículo “*Modelación del transporte de sedimentos en el Delta del río Sinú, Colombia*”, tuvieron como objetivo simular el transporte de sedimentos en el delta del Río Sinú y su impacto en la zona costera adyacente utilizando un modelo numérico 3D. La metodología empleada incluyó la implementación del sistema de modelación EFDC Explorer, que resuelve las ecuaciones de movimiento y transporte de sedimentos. Este modelo se configuró con datos de campo e información de agencias ambientales nacionales. Se determinó la dinámica y distribución espaciotemporal de los sedimentos suspendidos y se evaluó la vulnerabilidad de la zona estuarina ante variaciones hidrodinámicas. Los resultados mostraron áreas preferenciales de acumulación y dispersión de sedimentos, indicando que la zona costera es vulnerable a la sedimentación. La calibración del modelo fue verificada con el Índice de Concordancia, logrando un buen ajuste.

Martín (2020) en su investigación “*Análisis del efecto de la descarga fluvial en la distribución de salinidad de estuarios*”, tuvo como objetivo determinar cómo varía la posición de la zona de transición y la distribución salina en el estuario del río Guadiana, debido a la interacción entre la dinámica litoral y la descarga fluvial, considerando la construcción de la Presa de Alqueva y eventos de avenidas con diferentes periodos de retorno. La metodología incluye la elaboración de un modelo numérico tridimensional en el software Delft 3D. Primero, se establece el dominio espacial del problema con una aproximación geométrica idealizada del estuario. Luego, se definen las condiciones iniciales y de contorno basadas en el equilibrio salino en régimen medio y condiciones hidráulicas reales. Se realiza un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros físicos relevantes, como fricción, viscosidad y difusividad. Los resultados muestran cómo la posición de la zona de transición y la intrusión salina varían según la descarga fluvial y las mareas, evidenciando vulnerabilidades en la estabilidad del estuario.

### 2.1.2. *Investigaciones nacionales*

Santillan et al. (2023) en su artículo “*Modelación hidrodinámica e hidrológico de las inundaciones fluviales en la llanura de la reserva Nacional Pacaya Samiria, periodo 2018-2019*”. tuvieron como objetivo describir el proceso de inundación fluvial en la Reserva Nacional Pacaya Samiria y su impacto sobre la biodiversidad y la actividad pesquera. Se desarrolló un modelo bidimensional utilizando un dominio computacional que abarca la Reserva y su área de amortiguamiento. El modelo del terreno se basó en un DEM y batimetrías de los ríos Huallaga, Marañón, Ucayali, Pacaya y Amazonas. Se usaron datos de caudales del proyecto MOORE del CITA-UTEC y niveles de agua calibrados con estaciones hidrométricas del SENAMHI. Los resultados mostraron un caudal máximo de  $56,459,2m^3/s$  en el río Amazonas y un área de inundación máxima de  $6,698,92km^2$ , que corresponde al 19% de la Reserva para el año hidrológico 2018-2019. Se identificaron las principales rutas de descarga y se contrastaron las áreas inundadas con mapas de cobertura vegetal, geología y geomorfología, destacando la relación del ciclo hidrológico con la diversidad de flora y fauna y la productividad pesquera.

Angeles (2023) en su investigación “*Modelamiento Hidrodinámico del Flujo y Transporte de Sedimentos para la Evaluación del Riesgo de Erosión del Pilar del Puente Reque*”. tuvo como objetivo realizar el modelamiento hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos para determinar el riesgo de erosión del pilar del puente Reque. La metodología utilizada fue cualitativa-tecnológica con un diseño no experimental, empleando programas y software como Hec-Ras, HidroEsta, ArcGIS y AutoCAD Civil 3D. Se utilizó la observación directa y la recolección de datos como técnica e instrumento, respectivamente. La población estuvo conformada por todos los puentes sobre el río Reque entre Chiclayo y Reque, tomando como muestra el puente del río Reque en el distrito de Reque, provincia de Chiclayo. Los resultados del modelamiento hidrodinámico indicaron una socavación por contracción no uniforme de  $1,74m$  en el lecho del río y de  $1,35m$  en el margen derecho. Además, se determinó una erosión de  $3,29m$  en ambos pilares,  $3,38m$  en el estribo

del margen derecho y 2,21m en el estribo del margen izquierdo, concluyendo el riesgo de erosión del puente Reque.

Nuñez (2021) en su investigación “*Modelo hidráulico de transportes de sedimentos e influencia de los parámetros fluviales, en la confluencia de los ríos Tarma y Tulumayo*”, tuvo como objetivo analizar la evolución morfológica de la confluencia de los ríos Tarma y Tulumayo, formando el río Chanchamayo, utilizando un modelo hidráulico bidimensional. La metodología empleada incluyó el uso del modelo IBER para realizar simulaciones hidráulicas y morfológicas. La calibración del modelo se realizó mediante la modificación de los parámetros de contorno inicial, utilizando un modelo digital de elevación, la rugosidad de Manning y caudal aforado, además de datos obtenidos con un perfilador acústico de corrientes (ADCP). Para la modelación del flujo sólido, se consideró el transporte de material como carga de lecho, utilizando la ecuación de capacidad de transporte de Meyer-Peter y Muller. Los resultados mostraron mapas de tirante, velocidad, erosión y deposición, así como el terreno deformado. Se identificaron zonas de cambio morfológico en el cauce mediante un análisis multicriterio que consideró los diámetros medios de sedimentos y parámetros hidráulicos, evidenciando áreas de erosión y sedimentación.

## **2.2. Bases teóricas.**

### **2.2.1. Cuenca hidrográfica.**

Una cuenca hidrográfica es un área de terreno delimitada por una divisoria de aguas, donde la precipitación se acumula y drena a través de diversos afluentes hasta un río principal (Villón, 2011).

#### **Elementos de la Cuenca.**

- **Divisoria de Aguas:** También conocida como parteaguas, es una línea imaginaria que conecta los puntos más altos de la cuenca, separándola de las cuencas vecinas.

- **Área de la Cuenca:** Superficie en proyección horizontal, delimitada por la divisoria de aguas.
- **Río Principal de una Cuenca:** Es el curso de agua con mayor caudal o longitud, desde su origen hasta su desembocadura.

### Clasificación de la Cuenca.

- **En Relación al Tamaño:** Las cuencas se clasifican como grandes (más de 250  $km^2$ ) y pequeñas (menos de 250  $km^2$ ). Estas áreas experimentan precipitaciones intensas de corta duración, influenciadas por características físicas como el tipo de suelo y la vegetación. (Villón, 2011).
- **En Función a la Elevación:** Se dividen en alta, media y baja (Ver Figura 1).



Figura 1: Clasificación de la cuenca por su elevación

Nota. Tomado de (Nuñez, 2021)

La parte alta incluye las cabeceras de cerros y es predominada por la erosión. La parte media se caracteriza por el transporte de sedimentos, mientras que la parte baja, con un relieve plano y poca variabilidad, se llama como de deyección o zona de depósito.

- **Por la Dirección de la Evacuación de las Aguas:** Según Gamion (2014, p.26), las cuencas se clasifican en endorreicas y exorreicas. En las cuencas endorreicas, los ríos desembocan en lagos o ríos dentro del continente, mientras que, en las cuencas exorreicas, desembocan en el mar u océano.

## Características geomorfológicas de la cuenca

Para definir la geomorfología de una cuenca, se utilizan diversos parámetros relacionados con la forma, el relieve y el drenaje (red hidrográfica), los cuales son esenciales para clasificar y comparar diferentes cuencas:

### a) Parámetros de forma

Los parámetros geomorfológicos clave de una cuenca son:

- **Área (A):** Corresponde a la superficie delimitada de la cuenca, proyectada en un plano horizontal, generalmente de forma irregular.
- **Perímetro (P):** Es el contorno de la divisoria de aguas de la cuenca, es decir, el borde de la cuenca proyectada sobre un plano horizontal.
- **Factor de Forma (F):** Este factor relaciona el ancho promedio de la cuenca con su longitud (el recorrido más largo), proporcionando una idea de la forma de la cuenca.

Tabla 1: Valores Interpretativos del Factor de Forma.

Valores Aproximados	Forma de la Cuenca
$> 0,02$	Muy alargada
$0,22 - 0,30$	Alargada
$0,30 - 0,37$	Ligeramente alargada
$0,37 - 0,45$	Ni alargada, ni ensanchada
$0,45 - 0,60$	Ligeramente ensanchada
$0,60 - 0,80$	Ensanchada
$0,80 - 1,20$	Muy ensanchada
$\geq 1,20$	Redondeada

Nota. Tomado de (Nuñez, 2021)

- **Índice de Compacidad (IC):** Es la relación entre el perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de una circunferencia equivalente (Po).

## b) Parámetros de Relieve

Para describir el relieve de la cuenca, se utilizan parámetros como la pendiente de la cuenca y la curva hipsométrica:

- **Pendiente Media del Curso Principal (S):** Es la relación entre la diferencia de altitudes del cauce principal y su proyección horizontal. Influye en la velocidad del flujo y la capacidad erosiva del agua (Villón, 2011, p.49).
- **Curva Hipsométrica:** Indica el estado de equilibrio de la cuenca, relacionando el Área con la altitud. Ayuda a entender cómo influye en los procesos de escorrentía y erosión (Julca, 2014, p.21).

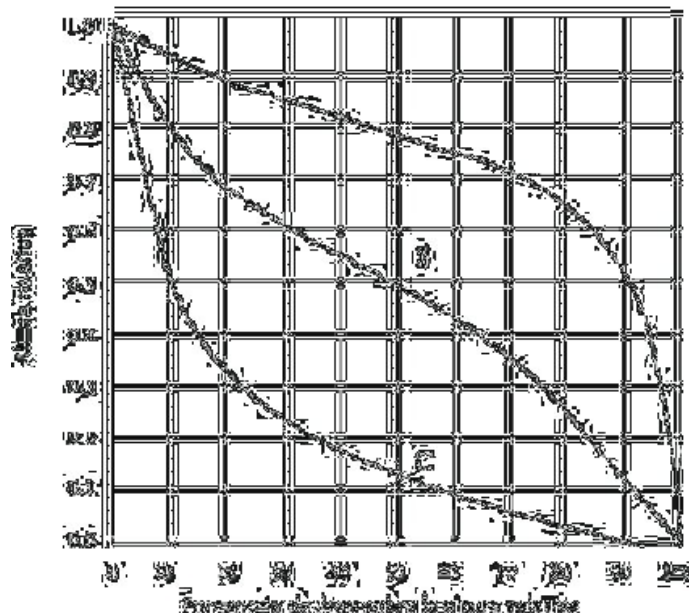


Figura 2: Curva hipsométrica

Nota. Tomado de (Nuñez, 2021)

## c) Parámetro de Drenaje

- **Longitud de Cauce Principal (L):** Es la distancia del cauce más largo, desde el inicio hasta el final de la cuenca, determinando el tiempo de paso del flujo a través de la misma.

### 2.2.2. Transformación de Lluvia en Esgurrimiento

El esgurrimiento es el agua de precipitación que se mueve superficial o subterránea-mente, llega a una corriente y drena hasta la salida de la cuenca, como se observa en el ciclo hidrológico. Cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo, se forma una lámina de agua que rompe la tensión superficial, iniciando así el esgurrimiento superficial, que se desplaza hacia la parte baja de la cuenca. Uno de los objetivos principales de la hidrología superficial es calcular la esgorrentía generada por una precipitación determinada (Sánchez, 2015).

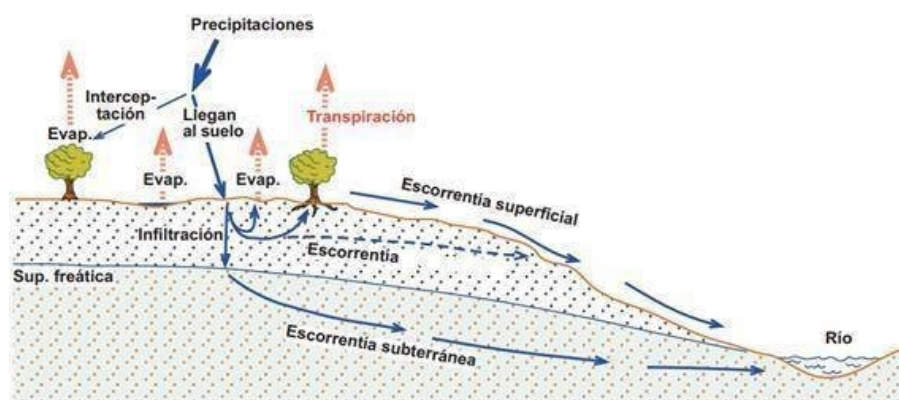


Figura 3: Ciclo hidrológico

Nota. Tomado de (Sánchez, 2015)

### Hidrograma

El hidrograma es la representación gráfica de las variaciones del caudal respecto al tiempo en orden cronológico en un lugar de la corriente” (Villón, 2011, p. 197). El área bajo el hidrograma representa el volumen de agua que pasa por un punto de aforo en un tiempo determinado. Sánchez (2015) señala que .en el estudio de una cuenca real con datos reales es necesario utilizar un modelo computacional, en el que se introducen las características físicas de la cuenca. Muy esquemáticamente, las fases del proceso son las siguientes” (p.2): ‘‘Teniendo en cuenta la geometría del cauce en una zona concreta, se calcula la altura que alcanzará el agua y las áreas que quedarán inundadas” (Sánchez, 2015, p.3); con el cambio morfológico del río se verifican las zonas de erosión y sedimentación del cauce

del río.

### **Cálculo de la Precipitación Neta**

Para determinar la precipitación neta, existen diversos métodos, siendo uno de los más destacados el propuesto por el S.C.S (Soil Conservation Service). Este método evalúa el porcentaje de precipitaciones que produce escorrentía directa, considerando factores como el tipo de suelo, el uso del suelo, la pendiente y la humedad previa del terreno (Sánchez, 2015, p.3).

### **Tiempo de Concentración**

Villegas define .el tiempo de concentración como el tiempo en que una gota de lluvia recorre la cuenca hasta el punto de salida” (s.f.). Una de las fórmulas más utilizadas para calcularlo es la de Kirpich:

$$t_c = 3,98 \left( \frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,77}$$

Donde  $t_c$  es el tiempo de concentración en minutos,  $L$  es la longitud del cauce en kilómetros, y  $S$  es la pendiente media en  $m/m$ .

### **Hidrograma Sintético**

Sánchez (2015) explica que un hidrograma puede representarse esquemáticamente como un triángulo, proporcionando parámetros clave como el caudal pico ( $Q_p$ ), el tiempo base ( $t_b$ ) y el tiempo en el que se produce el pico ( $t_p$ ). La figura 2.8 muestra la duración de la precipitación neta ( $D$ ) y el tiempo de retardo ( $t_r$ ) (p.5).

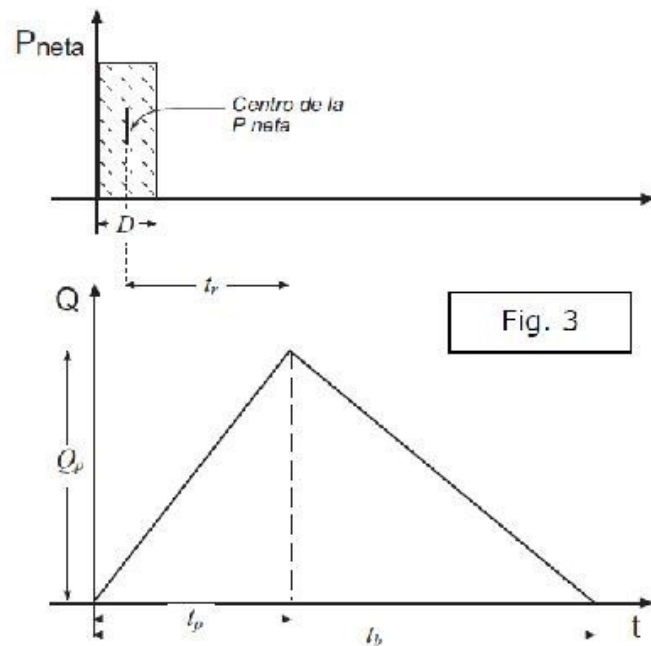


Figura 4: Hidrograma triangular

Nota. Tomado de (Sánchez, 2015)

### Hidrograma Triangular del S.C.S.

Para dibujar un hidrograma triangular, se necesitan las coordenadas de la punta del hidrograma (tiempo de punta y caudal de punta) y la abscisa del punto final (tiempo de base). Estos valores se calculan con las siguientes fórmulas (Sánchez, 2015, p.5):

$$t_p = 0,5D + t_r \approx 0,5D + 0,6t_c$$

$$t_b = 2,67t_p$$

$$Q_p = \frac{P.A}{1,8t_p}$$

Donde  $t_p$  es el tiempo de punta,  $D$  es la duración de la precipitación neta,  $t_r$  es el tiempo de retardo,  $t_c$  es el tiempo de concentración,  $t_b$  es el tiempo de base,  $Q_p$  es el caudal de punta,  $P$  es la precipitación neta y  $A$  es la superficie de la cuenca.

### Hidrograma Adimensional del S.C.S.

Este método adapta el hidrograma triangular a una forma más similar a la de un hidrograma real. Con los datos de la punta del hidrograma ( $t_p$  y  $Q_p$ ), se puede dibujar un hidrograma que refleje mejor las características de una cuenca real (Sánchez, 2015, p.6).

$t / t_p$	$Q / Q_p$	$t / t_p$	$Q / Q_p$
0,0	0	1,4	0,75
0,1	0,015	1,5	0,65
0,2	0,075	1,6	0,57
0,3	0,16	1,8	0,43
0,4	0,28	2,0	0,32
0,5	0,43	2,2	0,24
0,6	0,60	2,4	0,18
0,7	0,77	2,6	0,13
0,8	0,89	2,8	0,098
0,9	0,97	3,0	0,075
1,0	1,00	3,5	0,036
1,1	0,98	4,0	0,018
1,2	0,92	4,5	0,009
1,3	0,84	5,0	0,004

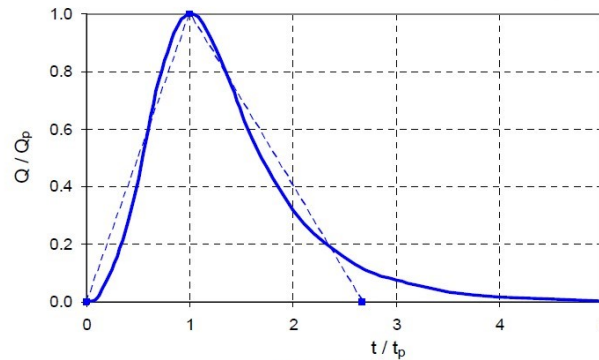


Figura 4

Figura 5: Hidrograma Adimensional

Nota. Tomado de (Sánchez, 2015)

### 2.2.3. Hidráulica Fluvial

Un río es un sistema de canales naturales que está en constante cambio de posición y forma debido a las fuerzas que actúan sobre su lecho y márgenes. Las intervenciones externas en una sección específica del río pueden tener efectos tanto aguas arriba como aguas abajo.

#### 2.2.3.1 Parámetros Hidráulicos y Geométricos

La geometría hidráulica se refiere a la sección transversal del cauce del río. Este estudio se basa en las relaciones entre los caudales, los niveles de agua y diversos parámetros hidráulicos y geométricos, como el área hidráulica, el ancho, la pendiente, la rugosidad y la velocidad de la corriente (Gamion, 2014, p.43).

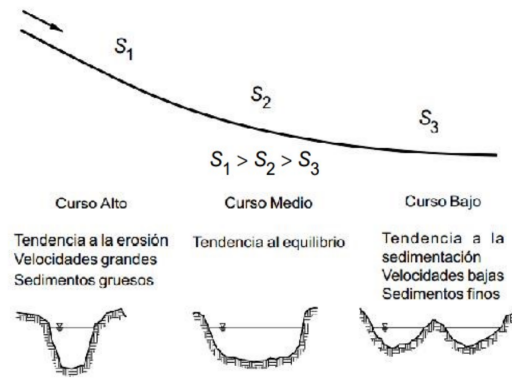


Figura 6: Perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un río

Nota. Tomado de (Rocha, 1988)

Gamion (2014) menciona que, para clasificar el régimen de flujo de un tramo de una corriente, se utiliza el Número de Froude ( $NF$ ), que es una relación adimensional entre las fuerzas de inercia y gravedad. Un flujo es subcrítico cuando  $NF < 1$ , característico de un régimen de llanura con baja velocidad. En cambio, el régimen supercrítico tiene  $NF > 1$ , propio de cauces de gran pendiente o ríos de montaña con alta velocidad. Además, existe un flujo crítico con  $NF = 1$ , que es un estado teórico representando el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico.

Cuando un cauce pasa de una pendiente alta a una pendiente baja, su capacidad de transporte se reduce, comenzando a depositar los materiales que recibe del tramo anterior. Esto forma islas y puede dar lugar a un cauce trenzado y divagante. El material depositado eleva el lecho del cauce y disminuye su capacidad a cauce lleno (Cachuan, 2017).

### 2.2.3.2 Curva Hipsométrica y Producción de Sedimentos

La curva hipsométrica se ha utilizado para diferenciar entre superficies erodables y sus distintas etapas evolutivas. El transporte de sedimentos varía según la topografía y responde de manera diferente a la variabilidad climática. El efecto del

Fenómeno del Niño Extremo sobre el transporte de sedimentos en suspensión es mayor en cuencas con curvas hipsométricas cóncavas hacia adentro (Norte) y menor en cóncavas hacia afuera (Sur), según el Caso Vertiente del Pacífico Peruano (Morera, 2014).

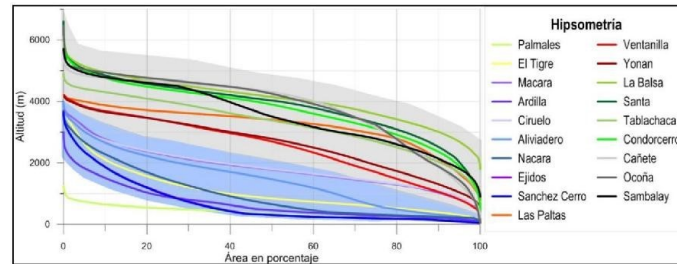


Figura 7: Curvas hipsométricas obtenidas del Caso Vertiente del Pacífico Peruano

Nota. Tomado de (Angeles, 2023)

### Clasificación del Transporte de Sedimentos

El transporte de sedimentos en un río se clasifica según el modo de transporte y el origen del material.

#### a) Modo de Transporte:

- **Suspensión:** Las partículas se mantienen suspendidas por la turbulencia del flujo.
- **Fondo:** Las partículas se transportan rodando, deslizándose o saltando. Una partícula en reposo puede empezar a moverse cuando se supera el umbral de movimiento, y si la corriente aumenta, puede pasar de ser transportada por el fondo a estar en suspensión. A mayor intensidad de la corriente, mayor es el tamaño del material de fondo transportado en suspensión (Vide, 2003, p.60).

#### b) Origen del Material:

- **Cuenca:** Material muy fino, conocido como material de lavado, se transporta desde la cuenca y se separa del material de fondo. Las partículas con un tamaño

inferior a  $0,0625mm$  (arcillas y limos) provienen mayormente del lavado de la cuenca, mientras que las partículas más grandes (arenas) provienen del lecho del río.

c) **Suspensión y Material de Lavado**

El transporte en suspensión puede representar más del 90 % del transporte sólido de un río, especialmente en ríos grandes, siendo el material de lavado una parte significativa. Este material está relacionado con las características hidrológicas de la cuenca, como la litología, los suelos, las pendientes, la vegetación, la precipitación y la escorrentía. Aunque se encuentra en pequeñas cantidades en los lechos principales, el material de lavado se deposita en las llanuras de inundación, formando depósitos de sedimentación vertical (Vide, 2003, p.61).

d) **Transporte de Fondo**

Aunque representa aproximadamente el 10 % del transporte de sedimentos, el transporte de fondo tiene un impacto significativo en la morfología del río, causando cambios geomorfológicos, erosión y sedimentación. Está relacionado con las características hidráulicas del cauce, como el ancho, la pendiente, la granulometría y el caudal (Vide, 2003).

#### 2.2.4. *Métodos para describir el flujo de fluidos*

Existen dos métodos principales para describir el movimiento de un fluido: el método Euleriano y el método Lagrangiano.

- **Método Euleriano:** Analiza el movimiento del fluido a través de un elemento infinitesimal de fluido que es constante en el espacio.
- **Método Lagrangiano:** Rastrea las propiedades físicas (como densidad, presión, temperatura y velocidad) de una partícula de fluido mientras se mueve a través del elemento de fluido, resultando en una forma no conservativa (Angeles, 2023).

### 2.2.5. Fuerzas en un Elemento de Fluido

Las fuerzas que actúan sobre un volumen de control de fluido se dividen en dos tipos:

- **Fuerzas Volumétricas:** Actúan sobre la masa volumétrica del fluido y operan a una distancia de la superficie.
- **Fuerzas Superficiales:** Actúan directamente sobre la superficie a través de esfuerzos normales y la distribución de esfuerzos.

El esfuerzo en un elemento se puede representar en función de las 9 componentes tensoriales del esfuerzo y la presión que actúa en un diferencial de fluido (Sansone, 2022).

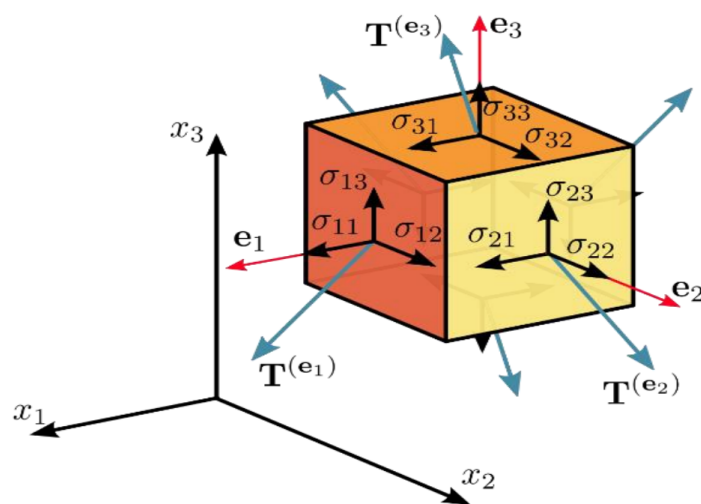


Figura 8: Componentes del esfuerzo viscoso en un volumen de control

Nota. Tomado de (Sansone, 2022)

### 2.2.6. Ecuaciones de Flujo de Fluidos

#### Conservación de Masa

Se basa en el principio de conservación de la masa, donde la tasa de incremento es igual

a la tasa neta de flujo másico en el elemento de fluido.

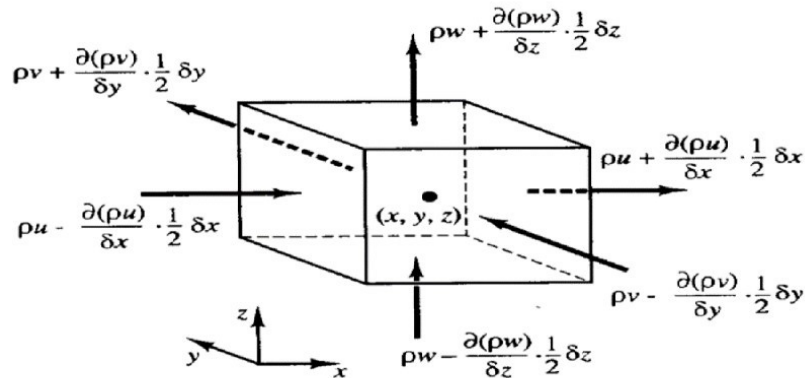


Figura 9: Entrada y salida de masa de flujo

Nota. Tomado de (Sansone, 2022)

Considerando incrementos infinitesimales  $dx, dy$  y  $dz$  para un fluido compresible, el flujo másico puede expresarse en función de sus tres componentes de velocidad  $(u, v, w)$  a lo largo de las direcciones de  $x, y$ , y  $z$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Para fluidos incompresibles, el primer término se anula, resultando en:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

### Ecuación 1: Conservación de Masa

#### Ecuación de Conservación de Momentum

Se basa en el principio de conservación del momentum lineal, donde la tasa de incremento de momentum por unidad de volumen de control es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre la partícula de fluido. Considerando la presión "p" y el esfuerzo cortante superficial en sus tres direcciones  $(t_{xx}, t_{yx}, t_{zx})$  la tasa temporal de incremento se representará por:

$$\rho \frac{Du}{dt}, \rho \frac{Dv}{dt}, \rho \frac{Dw}{dt}$$

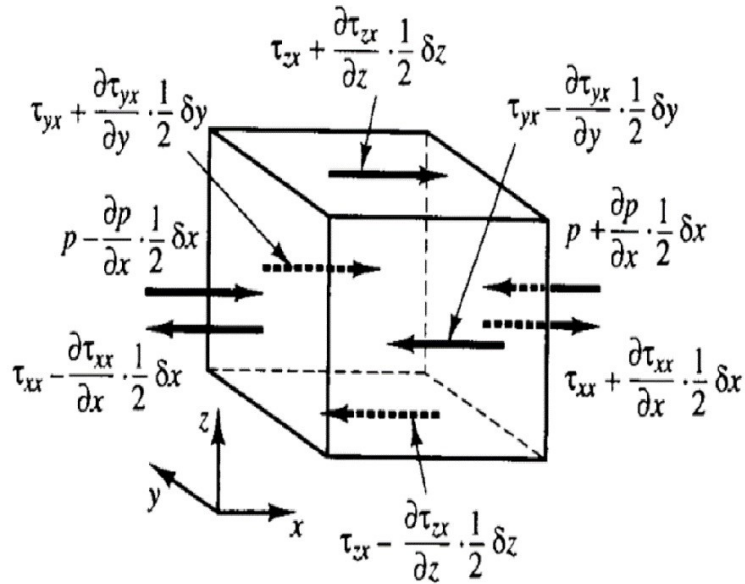


Figura 10: Fuerzas superficiales en una partícula de fluido

Nota. Tomado de (Sansone, 2022)

### 2.2.7. *Propiedades de los Sedimentos*

Los sedimentos poseen propiedades similares a las de cualquier partícula común, como tamaño, forma y parámetros físicos. Estas propiedades pueden ser estudiadas tanto de manera individual como colectiva (Gilja et al., 2017)

#### A. Propiedades de Partículas Aisladas

- a. **Peso Específico:** El peso específico influye en la disgregación y transporte de los materiales. Las partículas más pequeñas se disgregan y transportan más fácilmente que las de mayor diámetro, como las rocas. Generalmente, los sedimentos están compuestos por cuarzo y feldespato, con una gravedad específica de  $2,65t/m^3$ . Sin embargo, la gravedad específica puede variar debido al transporte de partículas en suspensión durante el crecimiento del cauce del río (Gilja et al., 2017).

- b. **Tamaño de la Partícula:** El tamaño de los sedimentos se define mediante parámetros como el diámetro nominal, el diámetro equivalente y la nomenclatura general (D50) (Gilja et al., 2017).
- c. **Velocidad de Sedimentación:** La velocidad de sedimentación afecta la capacidad de arrastre del cauce (directamente) y la forma del fondo (indirectamente) (Gilja et al., 2017). Se define como la velocidad de caída de un sedimento en un fluido, representada por la siguiente ecuación:

$$w = \sqrt{\frac{4g(\gamma_s - \gamma_a)}{3C_D \cdot \gamma_a} \cdot D_s}$$

Donde

$$C_D = \frac{24}{wD_s}$$

Reemplazando, la velocidad es:

$$w = \frac{g(\gamma_s - \gamma_a)}{18\nu * C_D \cdot \gamma_a} D_s^2$$

Se puede aplicar la Ley de Stokes cuando  $Re < 0,1$ , las partículas son pseudo-esféricas y del tipo arena fina.

d. **Propiedades de Partículas en Grupo**

Una propiedad importante es la granulometría. Los lechos granulares de los ríos están compuestos por partículas de diversas dimensiones, desde materiales finos hasta gruesos (Gilja et al., 2017).

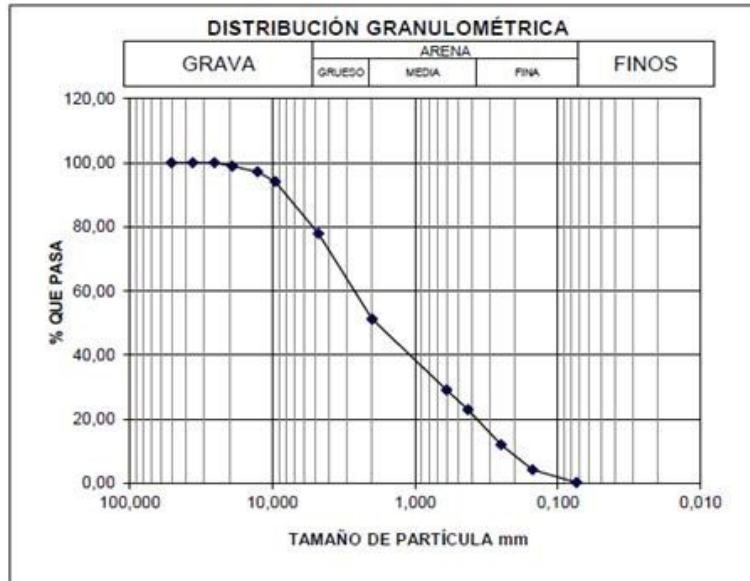


Figura 11: Curva granulométrica

Nota. Tomado de (Sansone, 2022)

### 2.2.8. *Suelos Cohesivos*

Los suelos cohesivos, compuestos por arcillas y limos, son cruciales en la dinámica de sedimentos. Estos suelos aportan factores que determinan el transporte de sedimentos, que a menudo se mantienen unidos a otras partículas por fuerzas de cohesión (enlaces químico-eléctricos) (Prieto, et al., 2020).

- **Equilibrio del Fondo:** Un río se considera en equilibrio cuando su perfil longitudinal permanece constante a lo largo del tiempo. En 1955, Lane propuso cuatro variables cualitativas para evaluar este equilibrio: la pendiente del fondo ( $i$ ), el caudal unitario ( $q$ ), el tamaño del sedimento ( $D$ ) y el caudal sólido unitario ( $qs$ ) (Prieto, et al., 2020).
- **Inicio del Movimiento:** El umbral de movimiento se define como el conjunto de condiciones que permiten el desplazamiento de partículas de sedimentos. Esto ocurre cuando la tensión de arrastre supera la resistencia de las partículas del lecho

del río. Estos parámetros se representan en el Diagrama de Shields (Prieto, et al., 2020).

La tensión de corte ( $t_0$ ) se define como la resistencia de las partículas a ser movidas, y se expresa mediante la relación entre la fuerza desestabilizadora y la estabilizadora, en función de la gravedad específica ( $\gamma_s - \gamma$ ) y el diámetro característico del volumen ( $D$ ).

$$\tau = \frac{t_0}{(\gamma_s - \gamma)D}$$

- Diagrama de Shields:** Este diagrama muestra la relación entre los parámetros descritos y los adimensionales, representando una curva que distingue entre la zona de reposo (baja) y la zona de movimiento (alta). A medida que aumenta  $Re$ , el flujo se vuelve más turbulento, haciendo que la curva tienda a volverse horizontal, y la tensión se vuelve independiente de  $Re$ , con valores en el intervalo  $[0,03, 0,06]$ [15]. La heterogeneidad granulométrica está linealmente relacionada con la tensión crítica y la tensión de corte en el lecho (Prieto, et al., 2020).

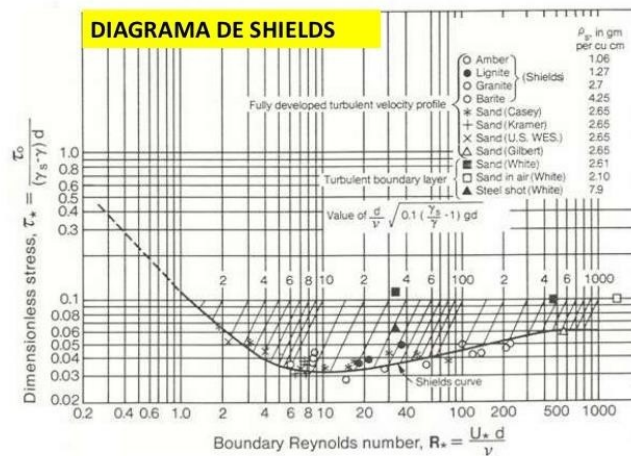


Figura 12: Diagrama de Shields

Nota. Tomado de (Angeles, 2023)

La heterogeneidad proporciona protección a las partículas finas, facilitando su movimiento, mientras que las partículas gruesas están más expuestas y tienen menor probabilidad de moverse.

### 2.2.9. *Erosión Hidráulica*

La erosión hidráulica es el movimiento o remoción de partículas del fondo de un cauce por la fuerza de las corrientes de agua. Es importante considerar que el suelo mismo resiste los esfuerzos de deformación que separan las partículas sedimentarias (Angeles, 2023).

#### A. **Tipología de la Erosión**

La erosión puede clasificarse de dos maneras: espacialmente (1D, 2D, 3D) y temporalmente, siguiendo su evolución a lo largo del tiempo [44]. La erosión temporal puede ser permanente, momentánea o transitoria. La erosión permanente ocurre a largo plazo debido a fenómenos geomorfológicos y puede incrementarse por la intervención humana. La erosión transitoria es momentánea y sucede durante periodos de crecidas y aumento del caudal del río (Angeles, 2023).

#### B. **Erosión Local**

La erosión local causa daños en largos tramos del río y está directamente relacionada con las crecidas y el aumento de la velocidad del cauce. Al aumentar el caudal, la capacidad erosiva supera la tensión que mantiene los sedimentos en el lecho, generando su movimiento y arrastre (Angeles, 2023).

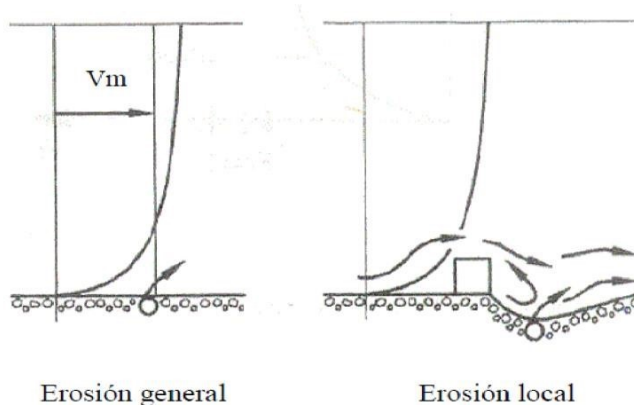


Figura 13: Erosión local

Este tipo de erosión presenta un flujo local fuerte con turbulencia, desarrollando vértices que desprenden el lecho del cauce. Ambos tipos de erosión pueden ocurrir simultáneamente, ya que se originan de manera independiente (Angeles, 2023).

### C. Erosión Local y el Arrastre de Sedimentos

La erosión local se basa en dos velocidades: la velocidad media del flujo, que depende de las propiedades hidráulicas del canal, y la velocidad de arrastre, que es la velocidad que provoca el movimiento de las partículas del lecho. Para el arrastre existen tres condiciones:  $V > V_c$ ,  $V < V_c$  y  $V = V_c$ . En la primera, la velocidad no genera arrastre; en la segunda, sí lo genera; y en la tercera, es el límite entre el estado estático y cinemático (Angeles, 2023).

### D. Erosión Local sin Arrastre de Sedimentos

También conocida como socavación de aguas claras, ocurre cuando  $V < V_c$ . Aquí, se incrementan los sedimentos en el foso de socavación, continuando la erosión local hasta alcanzar un nivel de equilibrio en un tiempo  $t$ .

## 2.3. Marco Conceptual.

### 2.3.1. Topografía

Es el estudio del relieve y la morfología del terreno en una zona específica es fundamental para comprender la configuración física del área de interés. Este análisis permite la creación de planos detallados, perfiles longitudinales y secciones transversales del cauce del río, que son esenciales para diversas aplicaciones en ingeniería civil, gestión de recursos hídricos y planificación territorial. La topografía proporciona información crítica sobre la pendiente del terreno, la distribución de elevaciones y la forma del paisaje, lo que facilita el diseño de infraestructuras y la implementación de proyectos de conservación y desarrollo sostenible (Gutarra, 2023). Además, la topografía es vital para la modelación hidrológica e hidráulica, ya que influye directamente en el comportamiento del flujo de

agua y en la identificación de áreas susceptibles a inundaciones o erosión.

### **2.3.2. *Hidrología***

Es el análisis del ciclo del agua, conocido como hidrología, abarca el estudio de las propiedades físicas y atmosféricas del agua a medida que circula por el medio ambiente. Este campo de estudio es esencial para comprender cómo el agua se mueve a través de la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo, y cómo estos movimientos afectan los ecosistemas y las actividades humanas. La hidrología investiga procesos como la evaporación, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía y flujo subterráneo. Además, proporciona información crucial para la gestión de recursos hídricos, el diseño de infraestructuras hidráulicas y la predicción de fenómenos naturales como inundaciones y sequías (Gutarra, 2023).

### **2.3.3. *Intensidad de lluvias***

La intensidad de lluvias se refiere a la cantidad de agua que cae durante un evento de precipitación, medida en milímetros por hora ( $mm/h$ ). Este parámetro es crucial para la evaluación y gestión de recursos hídricos, ya que determina la rapidez con la que se acumula el agua en una región específica. La intensidad de la lluvia afecta directamente los procesos de escorrentía superficial y la capacidad de infiltración del suelo, influyendo en la posibilidad de inundaciones y la recarga de acuíferos. Medir y analizar la intensidad de las lluvias es esencial para el diseño de sistemas de drenaje urbano, la planificación de infraestructuras hidráulicas y la implementación de medidas de mitigación de riesgos asociados con eventos de lluvia extrema (Gutarra, 2023).

#### **2.3.4. *Hidráulica***

La hidráulica es la disciplina que estudia la mecánica de los fluidos, enfocándose en el comportamiento y las propiedades de líquidos en movimiento y en reposo. Este campo es esencial para comprender cómo los fluidos, particularmente el agua, se comportan en diferentes entornos, como el cauce de un río. La hidráulica permite analizar el flujo del agua en ríos y canales, incluyendo aspectos como la velocidad, presión y turbulencia del flujo. Este conocimiento es crucial para el diseño y optimización de infraestructuras hidráulicas, como presas, canales de riego, sistemas de drenaje y obras de protección contra inundaciones. Además, el estudio de la hidráulica ayuda a predecir y gestionar fenómenos naturales como las inundaciones y la erosión del lecho del río, proporcionando las bases para la implementación de medidas de control y mitigación (Gutarra, 2023).

#### **2.3.5. *Caudal***

El caudal se refiere al volumen de flujo de agua que se desplaza desde un punto a otro en un determinado período de tiempo. Este parámetro es fundamental en la hidrología y la ingeniería hidráulica, ya que cuantifica la cantidad de agua que atraviesa una sección transversal de un río, canal o cualquier otro conducto en un tiempo específico. Medir el caudal es esencial para la gestión y planificación de los recursos hídricos, permitiendo evaluar la disponibilidad de agua para diferentes usos, como el abastecimiento humano, la agricultura, la generación de energía hidroeléctrica y la conservación ambiental. El caudal también es crucial para el diseño de infraestructuras hidráulicas, ya que influye en la capacidad y eficiencia de sistemas de riego, drenaje y control de inundaciones (Gutarra, 2023).

#### **2.3.6. *Clasificación de suelos***

La clasificación de suelos es el proceso mediante el cual se caracterizan los suelos según su composición granulométrica, es decir, la distribución de tamaños de las partículas que

lo conforman, y sus propiedades químicas. Este proceso es fundamental en el campo de la ingeniería civil, la agronomía y la gestión ambiental, ya que permite identificar las características y capacidades de diferentes tipos de suelos. La clasificación granulométrica ayuda a determinar la textura del suelo, que influye en su capacidad de retención de agua, permeabilidad y estabilidad estructural. Por otro lado, las propiedades químicas del suelo, como el pH, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de nutrientes, son cruciales para evaluar su fertilidad y aptitud para diversos usos agrícolas y forestales. La correcta clasificación de suelos es esencial para el diseño de infraestructuras, la planificación del uso del suelo y la implementación de prácticas de manejo sostenible, asegurando así un aprovechamiento eficiente y responsable de los recursos naturales (Prieto, et al., 2020).

### **2.3.7. *Hidrodinámica***

La hidrodinámica es el estudio de la dinámica de los fluidos, centrándose en el movimiento y comportamiento de líquidos y gases, teniendo en cuenta factores como la densidad del fluido y los materiales que transportan. Este campo es esencial para comprender cómo los fluidos interactúan con su entorno, cómo se distribuyen las fuerzas dentro de ellos y cómo transportan partículas, sedimentos y otras sustancias. La hidrodinámica tiene aplicaciones cruciales en diversas áreas, como la ingeniería ambiental, la oceanografía, la hidráulica y la ingeniería civil. Permite diseñar y optimizar sistemas de transporte y distribución de fluidos, evaluar y mitigar el impacto de fenómenos naturales como inundaciones y corrientes marinas, y desarrollar tecnologías para el tratamiento y gestión de aguas residuales (Gamion, 2014).

### **2.3.8. *Río***

Un río es una corriente natural de agua que se forma a partir de la escorrentía superficial y la confluencia de cuencas debido a las precipitaciones. Los ríos desempeñan

un papel fundamental en el ciclo hidrológico, actuando como conductos que transportan agua desde las áreas de alta precipitación hacia los océanos, lagos u otros cuerpos de agua. Además de su función en la circulación del agua, los ríos son cruciales para la biodiversidad, proporcionando hábitats para una amplia variedad de especies acuáticas y terrestres. También son vitales para las actividades humanas, ofreciendo recursos esenciales como agua potable, oportunidades de navegación, riego para la agricultura y energía hidroeléctrica. La dinámica de un río, incluyendo su caudal, velocidad y capacidad de transporte de sedimentos, depende de múltiples factores como la topografía, el clima y las características de la cuenca hidrográfica (Gamion, 2014).

### **2.3.9. *Meandro***

Un meandro es una curva pronunciada en el curso de un río, típicamente encontrado en ríos de curso bajo o con pendientes suaves. Estos sinuosos giros y vueltas se forman debido a la erosión y deposición de sedimentos en los márgenes del río, creando un patrón serpenteante característico. Los meandros son comunes en las desembocaduras de los ríos y en terrenos llanos donde la pendiente es mínima, permitiendo que el agua fluya de manera más horizontal que vertical. Este proceso geomorfológico es importante porque afecta la dinámica del flujo del río, incluyendo la velocidad del agua y la distribución de sedimentos. Además, los meandros pueden influir en la formación de hábitats acuáticos diversos y fértiles llanuras aluviales, que son cruciales para la biodiversidad y la agricultura (Gamion, 2014).

### **2.3.10. *Socavación***

La socavación es un fenómeno causado por la velocidad del flujo de agua que resulta en la pérdida de partículas del suelo en el lecho del cauce. Este proceso ocurre cuando la fuerza del agua en movimiento supera la resistencia del suelo o los sedimentos que forman el lecho del río, arrancando y transportando estas partículas río abajo. La socava-

ción puede tener impactos significativos en la estabilidad de las estructuras hidráulicas, como puentes y diques, y en la morfología del cauce del río. La pérdida de material del lecho puede provocar la erosión de las márgenes del río, el ensanchamiento del cauce y la profundización del lecho, alterando el flujo y la capacidad de transporte del río. Además, la socavación es un factor crucial a considerar en el diseño y mantenimiento de infraestructuras cercanas a cuerpos de agua, ya que puede comprometer su integridad y funcionalidad (Gutarra, 2023).

### **2.3.11. *Sistema fluvial***

Un sistema fluvial se refiere a la caracterización y estudio de los distintos tipos de ríos, abarcando el comportamiento del flujo de agua en términos de erosión, transporte y sedimentación. Este concepto incluye la comprensión de cómo los ríos moldean el paisaje, cómo transportan y depositan sedimentos y cómo interactúan con su entorno geológico y biológico. Los sistemas fluviales son dinámicos y complejos, influidos por factores como el clima, la topografía, la geología del terreno y las actividades humanas. El análisis de un sistema fluvial implica estudiar los procesos de erosión que desgastan y transforman el lecho y las orillas del río, el transporte de sedimentos desde las áreas de origen hasta los lugares de deposición, y la sedimentación que contribuye a la formación de nuevas estructuras geológicas como deltas y llanuras aluviales (Gutarra, 2023).

## **3. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1. Enfoque**

La presente investigación presenta un enfoque cuantitativo. Este estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo debido a su énfasis en la recolección y análisis de datos numéricos que permiten la creación de un modelo hidrodinámico preciso. El objetivo principal es predecir la sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui y evaluar su

impacto en el canal de riego Santa Inés. Para ello, se utilizan métodos estadísticos y técnicas computacionales avanzadas, que son características distintivas de la investigación cuantitativa. Además, el enfoque cuantitativo permite la aplicación de ecuaciones matemáticas y principios físicos que describen el comportamiento del flujo y el transporte de sedimentos. Mediante simulaciones numéricas, el modelo puede evaluar diferentes escenarios y estrategias de manejo, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas. Este enfoque es esencial para comprender la compleja dinámica fluvial y su interacción con las infraestructuras de riego, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia del sistema de riego en la provincia de Lucanas.

### **3.2. Alcance**

Esta investigación se clasifica principalmente de un alcance aplicado ya que tiene como objetivo aplicar los conocimientos obtenidos para resolver problemas específicos mediante la creación o mejora de herramientas. En este caso, el desarrollo de un modelo hidrodinámico para la dinámica fluvial tiene una aplicación directa en la gestión y planificación de recursos hídricos, ayudando a prever y mitigar problemas de sedimentación y erosión que pueden afectar infraestructuras críticas como canales de riego.

### **3.3. Diseño de investigación**

La investigación es de diseño no experimental, puesto que, en este tipo de diseño, se basa en observaciones, análisis de datos existentes o simulaciones para estudiar relaciones y efectos. En este caso, se desarrolló un modelo hidrodinámico para predecir la sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui y su impacto en el canal de riego Santa Inés. Este enfoque permite analizar los fenómenos fluviales y sus efectos sin manipular directamente las variables del entorno natural, utilizando en su lugar simulaciones computacionales basadas en datos recopilados.

## **3.4. Población y muestra**

### **3.4.1. Población**

En esta investigación, la población abarca todos los elementos del sistema fluvial y los canales de riego en la cuenca del río Huallamalqui, así como otros canales de riego en la provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho.

### **3.4.2. Muestra**

La muestra específica es el canal de riego Santa Inés dentro de la cuenca del río Huallamalqui. Esta muestra se selecciona para desarrollar y validar el modelo hidrodinámico, focalizándose en los impactos de sedimentación y erosión en esa área particular.

## **3.5. Hipótesis**

### **3.5.1. Hipótesis general**

El desarrollo de un modelo hidrodinámico de dinámica fluvial permitirá analizar y predecir con precisión los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui, y evaluará efectivamente su impacto en el Canal de Riego Santa Inés en la Provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho.

### **3.5.2. Hipótesis específicas**

- La recopilación y análisis de datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos de la cuenca del río Huallamalqui y del Canal de Riego Santa Inés proporcionarán información precisa y detallada necesaria para desarrollar un modelo hidrodinámico fiable.
- El desarrollo y calibración de un modelo hidrodinámico que simule la dinámica

fluvial del río Huallamalqui permitirá representar con precisión los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca.

- La evaluación del impacto de los procesos de sedimentación y erosión, mediante simulaciones del modelo hidrodinámico, demostrará cómo estos procesos afectan la eficiencia y sostenibilidad del Canal de Riego Santa Inés.

### 3.6. Operacionalización de variables

A. **Variable Independiente:** Modelo hidrodinámico de dinámica fluvial.

**Indicadores:**

- Precipitación
- Caudal
- Niveles de agua
- Altimetría
- Composición de sedimentos

B. **Variable Dependiente:** Sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui

**Indicadores:**

- Tasa de acumulación de sedimentos
- Tasa de erosión en distintas secciones del río

C. **Variable Dependiente:** Impacto en el Canal de Riego Santa Inés

**Indicadores:**

- Volumen de agua disponible para riego
- Capacidad de adaptación a cambios en la dinámica fluvial

Tabla 2: Cuadro de Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Tipo	Naturaleza	Medición	Dimensión	Indicadores	Unidad de Medida
<b>Modelo hidrodinámico fluvial</b>	Un modelo hidrodinámico simula el comportamiento del agua en ríos, incluyendo flujos, sedimentación y erosión, para predecir y gestionar cambios en el cauce y entorno fluvial.	<b>Independiente</b>	<b>Cuantitativa</b>	<b>Razón</b>	Datos Hidrológicos, Topográficos y Sedimentológicos	<b>Precipitación</b>	( <i>mm</i> )
						<b>Caudal</b>	( <i>m<sup>3</sup>/s</i> )
						<b>Niveles de agua</b>	( <i>m</i> )
						<b>Altimetría</b>	( <i>m.s.n.m.</i> )
						<b>Composición de sedimentos</b>	( <i>%</i> )
<b>Sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui</b>	La sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui son procesos que involucran la deposición y desgaste del suelo y sedimentos, afectando la morfología y dinámica del cauce fluvial.	<b>Dependiente</b>	<b>Cuantitativa</b>	<b>Razón</b>	Sedimentación	<b>Tasa de acumulación de sedimentos</b>	( <i>t/año</i> )
					Erosión	<b>Tasa de erosión en distintas secciones del río</b>	( <i>t/año</i> )

<b>Impacto en el Canal de Riego Santa Inés</b>	Se refiere a cómo la sedimentación y erosión afectan su eficiencia, sostenibilidad, y capacidad de transporte de agua, influenciando su funcionamiento y mantenimiento.	<b>Dependiente</b>	<b>Cualitativa</b>	<b>Nominal</b>	Eficiencia del Canal de Riego	<b>Volumen de agua disponible para riego</b>	( $m^3$ )
						<b>Capacidad de adaptación a cambios en la dinámica fluvial</b>	(Escala de 1 a 5)

Nota: Elaboración propia

## 3.7. Técnicas e instrumentos

### 3.7.1. *Técnicas*

- **Revisión bibliográfica:** Se revisó la literatura existente sobre modelos hidrodinámicos aplicados a ríos similares y se ha estudiado las particularidades hidrológicas y geomorfológicas de la cuenca del río Huallamalqui.
- **Recolección de datos secundarios:** Se obtuvo datos sobre precipitaciones, temperatura y otros relevantes que afectan el flujo y sedimentación del río.

### 3.7.2. *Instrumentos*

- Software de simulación Python
- Software estadístico Excel y  $\mathcal{R}$
- Fichas de registros de datos secundarios

## 3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

En esta investigación, se utilizó varias técnicas estadísticas para procesar y analizar la información recopilada. Estas técnicas permitieron interpretar los datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos, así como evaluar la precisión y efectividad del modelo hidrodinámico desarrollado. A continuación, se describen las principales técnicas estadísticas que se emplearán:

### A. Análisis Descriptivo:

- **Medidas de Tendencia Central:** Se utilizaron medias, medianas y modas para resumir los datos hidrológicos (precipitación, caudal) y sedimentológicos (tamaño de partículas, composición).

## B. Análisis de Correlación:

- **Coefficiente de Correlación de Pearson:** Se aplicó para determinar la relación entre variables, como la relación entre caudal y niveles de agua, o entre precipitación y tasas de sedimentación.
- **Análisis de Correlación Múltiple:** Se utilizó para evaluar las interacciones entre múltiples variables hidrológicas y sedimentológicas.

## C. Análisis de Regresión:

- **Regresión Lineal Simple y Múltiple:** Se utilizó modelos de regresión para predecir valores de una variable dependiente (como la tasa de sedimentación) en función de una o más variables independientes (como el caudal y la pendiente).
- **Regresión No Lineal:** En caso de relaciones no lineales, se emplearon técnicas de regresión no lineal para ajustar los datos.

## D. Análisis de Series Temporales:

- **Descomposición de Series Temporales:** Se analizaron datos temporales de precipitación y caudal para identificar tendencias, estacionalidades y componentes irregulares.
- **Modelos ARIMA:** Se utilizaron modelos autorregresivos integrados de media móvil para predecir tendencias futuras en datos hidrológicos y sedimentológicos.

### 3.9. Desarrollo del Trabajo de Tesis

#### 3.9.1. *Datos Topográficos*

##### a) **Ubicación Geográfica**

La cuenca que alimenta la quebrada donde se proyecta la construcción de la bocatomina se encuentra a una altitud de 3,738,55msnm y está localizada en las siguientes coordenadas UTM: 542,115 E y 8'408,384 N, con una cota de 3005,54msnm.

##### b) **Ubicación Política**

El proyecto se encuentra situado tanto política como geográficamente en la siguiente ubicación:

- Anexo: Santa Inés
- Distrito: San Pedro de Palco
- Provincia: Lucanas
- Región: Ayacucho

##### c) **Límite**

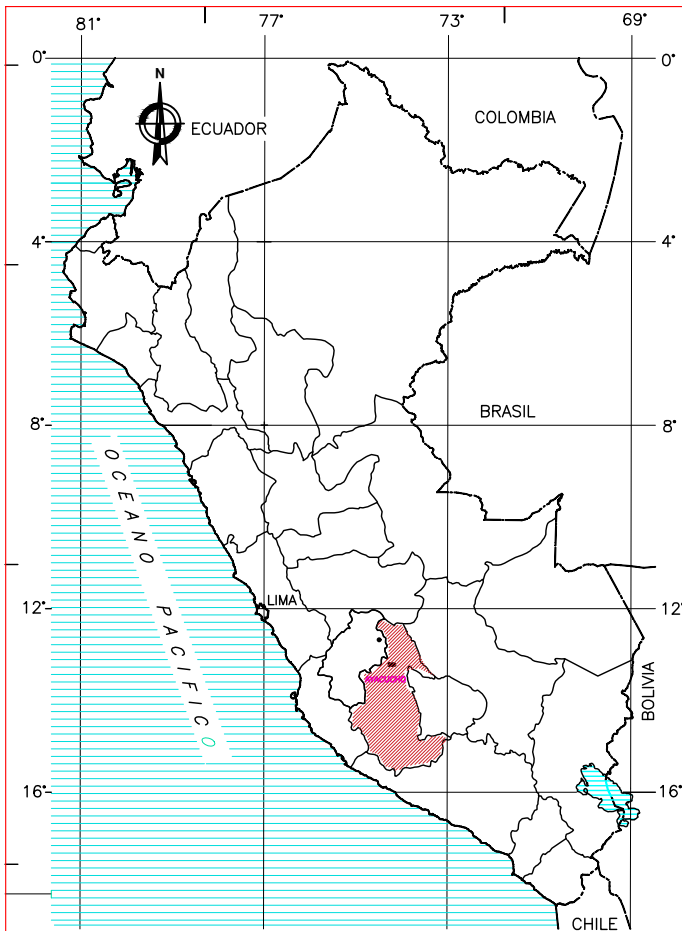
La microcuenca tiene los siguientes límites:

- Norte: Límite con la provincia de Huancasancos.
- Sur: Limita con el distrito de Otonce.
- Este: Limita con los distritos de Aucara y Lucanas.
- Oeste: Limita con el distrito de Ocaña.

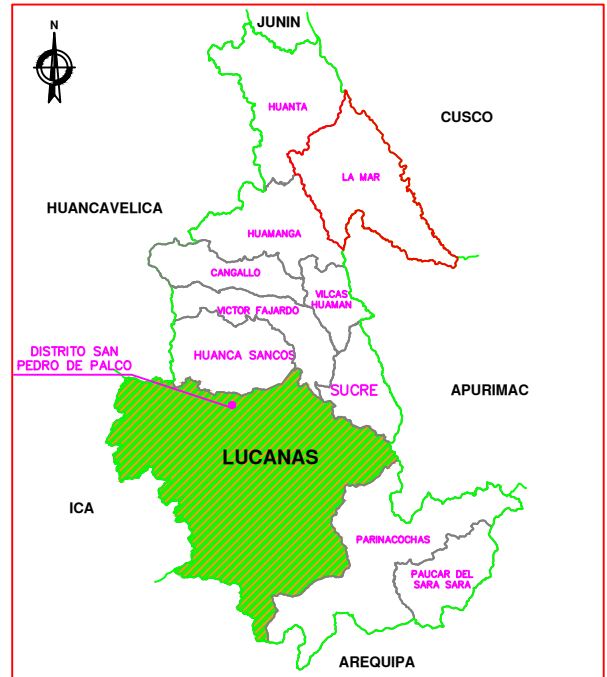
#### 3.9.2. *Característica de la cuenca del Río Huallamalqui*

La cuenca del río Huallamalqui se caracteriza por sus atributos geográficos y naturales detallados a continuación:

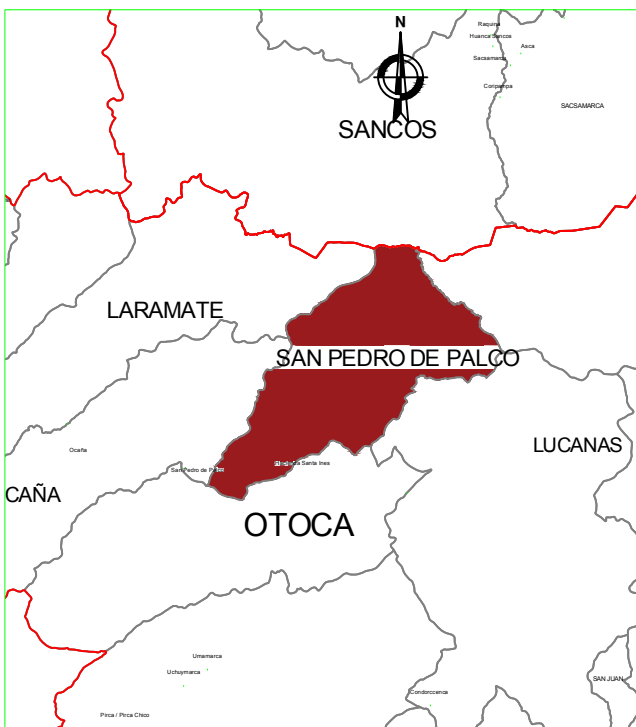
# PLANO DE UBICACIÓN DE LA CUENCA



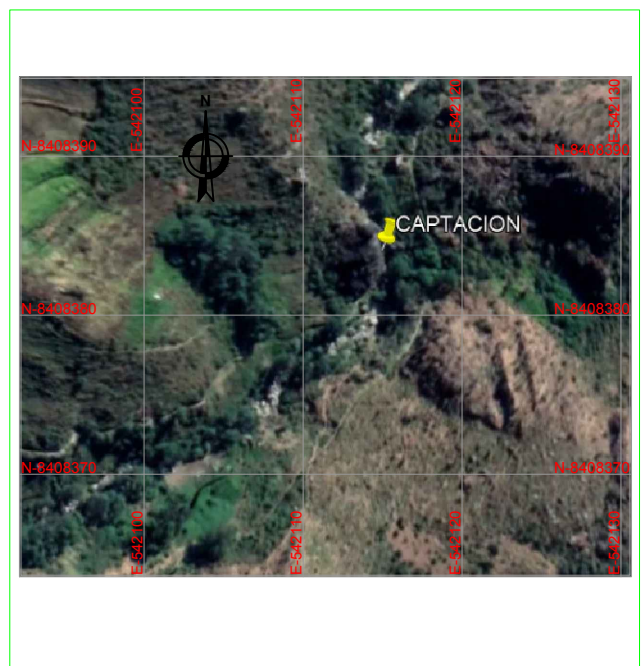
## UBICACION DEPARTAMENTAL



## UBICACION PROVINCIAL



## UBICACION DISTRITAL



## UBICACION DE CUENCA

#### a) **Ubicación y Dimensiones**

- Punto de captación: Se encuentra en las coordenadas 8,408,384,00m (Norte) y 542,115,00m (Este), con una altitud de 3,005,54msnm.
- Área de la cuenca: Comprende una extensión de 104,15km<sup>2</sup>.
- Perímetro: Tiene un contorno de 52,64km.

#### b) **Cubertura Vegetal**

La vegetación predominante en la cuenca es el ichu, que junto con otras especies cubre aproximadamente el 80 % del área. El 20 % restante corresponde a afloramientos rocosos fisurados y fragmentados, los cuales desempeñan un papel importante en la retención de humedad. Estas formaciones, en conjunto con la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, permiten que se mantengan activos manantiales durante largos periodos, asegurando una descarga base incluso en épocas de sequía.

### 3.9.3. *Parámetros geomorfológicos de la cuenca*

El análisis del comportamiento hídrico de las cuencas se realiza identificando y evaluando parámetros clave que permiten determinar coeficientes útiles para comprender los fenómenos naturales asociados. Para ello, se consideran los siguientes aspectos, enfocados en evaluar sus características físicas:

- Índice de forma de la microcuenca: Calculado como:

$$K = \frac{\text{Perímetro de la microcuenca}}{\text{Perímetro del círculo del área equivalente}}$$

- Tiempo de concentración.
- Densidad de drenaje.
- Factor de forma.
- Coeficiente de escorrentía.

Además, se analizan los parámetros básicos de la cuenca, que incluyen:

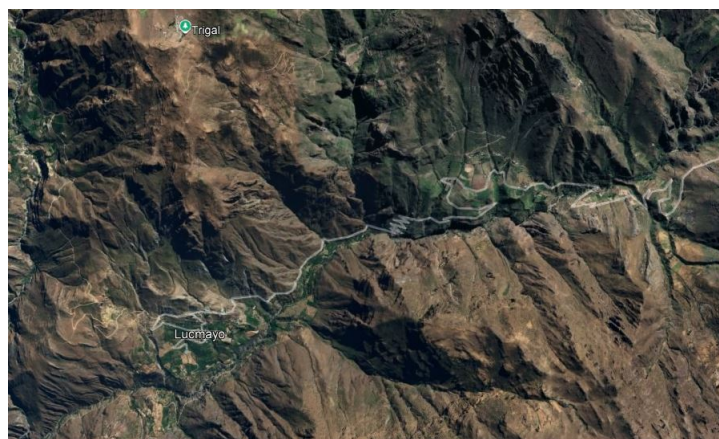


Figura 14: Vista satelital de la cuenca

Nota: elaboración propia



Figura 15: Punto de aforo de la cuenca

Nota: elaboración propia

- Perímetro: Longitud del contorno de la cuenca.
- Área: Extensión superficial de la cuenca.

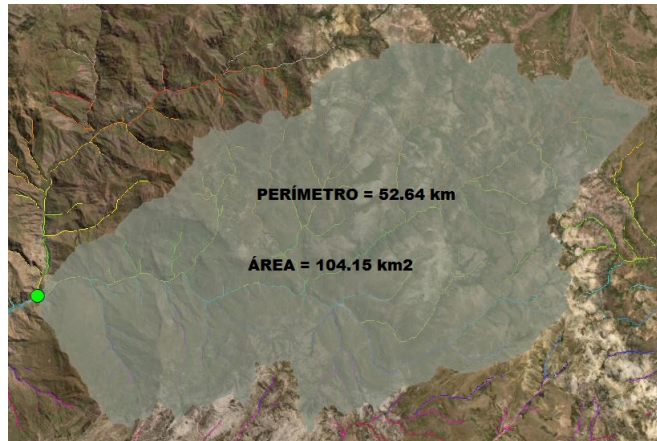


Figura 16: Área y perímetro de la cuenca  
Nota: elaboración propia

- Longitud: Longitud del cauce principal.
- Pendiente: Relación entre la altura y la longitud del cauce.
- Diferencia de nivel: Rango altitudinal en metros sobre el nivel del mar (*msnm*).

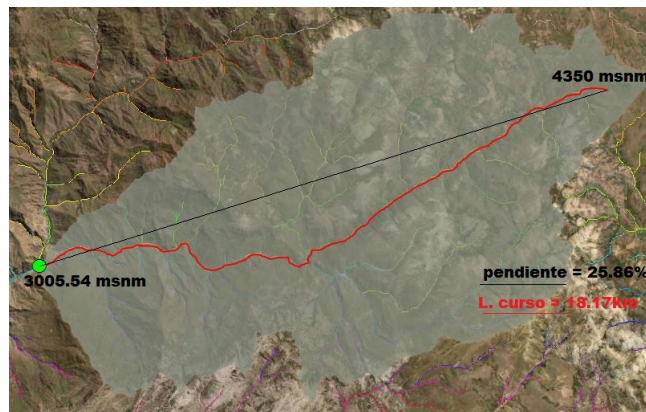


Figura 17: Parámetros morfométricos de la cuenca  
Nota: elaboración propia

Estos parámetros se determinan tras evaluar el comportamiento físico de la cuenca y su capacidad de escurrimiento, con el objetivo de determinar su aporte hídrico a la cuenca del río Huallamalqui.

Tabla 3: Parámetros de la cuenca del río Huallamalqui.

Descripción	Unidad	Valor
Área de la cuenca	Kilómetros cuadrados	104.15
Perímetro de la cuenca	Kilómetros	52.64
Cota máxima	msnm	4350
Cota mínima	msnm	3005.54
Centroide X	Kilómetros	546.04
Centroide Y	Kilómetros	8413.92
Centroide Z	msnm	3883.95
Altitud media	msnm	3883.95
Altitud más frecuente	msnm	4242
Altitud de frecuencia media	msnm	4198.5
Pendiente promedio de la cuenca	%	25.86
Longitud del curso principal	Kilómetros	18.17
Orden de la red hídrica	y	6
Longitud de la red hídrica	Kilómetros	581.15
Pendiente promedio de la red hídrica	%	2.57
Factor de forma de Horton (Kf)		0.32
Índice de Compacidad o de Gravelius (Kc)		1.44
Coefficiente de Circularidad de Miller (Cc)		0.47
Densidad de drenaje (D)	Kilómetros/ $Km^2$	5.58
Tiempo de concentración	horas	1.37

Nota: Información tomada del Informe Técnico N° 003-2020 ANA-AAA-CH.CH-ALA GRANDE. Fuente (Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco, 2020).

### 3.9.4. Datos Hidrológicos

#### a) Oferta hídrica

Los datos hidrológicos constituyen un aspecto fundamental en el análisis de los recursos hídricos disponibles en una región. Este apartado se enfoca en describir la oferta hídrica, evaluando la disponibilidad de agua en términos de su cantidad y distribución temporal, con base en registros históricos de precipitación, caudales y otros parámetros relevantes. Estos datos son esenciales para determinar la capacidad de la cuenca para satisfacer las demandas de agua para diversos usos, como riego, consumo humano o actividades económicas, asegurando un manejo sostenible del recurso.

Tabla 4: Precipitación mensual generada en la cuenca rio Huallamalqui

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
<b>1980</b>	78.9	54.79	127.35	47.84	4.67	2.64	0.39	1.1	12.54	37.34	16.65	29.29	373.85
<b>1981</b>	95,80	213.4	138,97	47,84	5.74	3.91	1.29	24,99	12.54	37.34	16,65	45,76	666,35
<b>1982</b>	115,97	119	111,74	42.24	4.56	0,93	2.36	5.87	20.01	35,00	45,76	32,55	535,95
<b>1983</b>	76,60	81.1	100.03	34.43	3.12	1,99	2.23	14.07	14.07	24.27	18.2	54.37	403,69
<b>1984</b>	134,75	155,50	145,51	38,97	7.12	1,78	2.45	4.31	9.05	26.01	78,43	68,79	764.01
<b>1985</b>	89,67	170,56	297,82	91.2	24,84	11,75	4,78	5.4	9.05	26.01	78,43	78,43	815.81
<b>1986</b>	193,96	190,00	218,95	44,74	7.34	1.43	2.8	7.29	9.05	26.01	78,43	79.12	771,81
<b>1987</b>	153	82.07	95,41	25,85	7.34	1.43	2.36	7.29	9.05	26.01	78,43	45,57	542,97
<b>1988</b>	117.4	133.1	114,94	40,81	8.52	2.33	1.91	6.07	14,91	20.56	41.42	42,15	759.11
<b>1989</b>	243,80	188,48	189,95	38.06	8.52	2.33	1.91	6.07	14,91	20.56	41.42	61,72	959.11
<b>1990</b>	110.1	73.12	105,53	34,48	38,82	29.4	1.31	2.33	1.91	14.42	22.42	80,40	605,98

<b>1991</b>	87,19	67,83	168,87	33.33	1,95	1.31	1.31	2	5.64	14.42	22.42	22.42	434,91
<b>1992</b>	34,55	66.32	62,45	14.37	1.52	1.31	1	1.31	5.64	14.42	19.3	19.3	259,51
<b>1993</b>	118,50	127.3	111,51	48,61	1.31	1	2.43	3.83	7.83	25.01	31,65	66,69	569,42
<b>1994</b>	170,89	201,52	166,82	56,43	17.18	15.5	4.1	16.49	13.02	31,65	31,65	31,65	739,25
<b>1995</b>	142,41	219,76	127.37	84,97	5.72	1.57	0,72	3.16	9.12	31,65	31,65	100.3	716,25
<b>1996</b>	149,61	219,70	127.36	84,97	5.72	1.57	0,72	3.16	9.12	31,65	31,65	77,60	694.23
<b>1997</b>	128.2	143,65	89.23	37.08	3.83	0,93	0,32	2.08	21.28	31,65	31,65	61,91	605,58
<b>1998</b>	181,78	117,45	124,27	23.37	0,93	0,32	0,66	2.51	3.13	20.24	20.24	47,69	611,91
<b>1999</b>	194,57	206.4	138,35	45,46	11	1.31	4.61	11.63	9.72	17.84	25,49	102.4	788,73
<b>2000</b>	164.1	186,95	152,25	53,88	10,90	4.92	2.33	7.22	10.33	25,49	35.02	88,46	694.23
<b>2001</b>	126.1	152,69	160,55	37.2	15,70	5.47	2.33	7.22	10.33	25,49	35.02	86,72	705,80
<b>Media</b>	131.8	112.4	113.02	34.96	5.3855	2.7	2.12	4.4928	8.937	22.38	26.96	47.67	776.21
<b>Min</b>	110.1	66.32	89.23	14.37	1.31	1	1	1.1	1.91	14.42	18.2	19.3	694.23
<b>Max</b>	164.1	213.4	127.3	91.2	17.18	29.4	4.61	16.49	21.28	37.34	41.42	102.4	959.11

Nota: Información tomada del Informe Técnico N°003 – 2020 ANA-AAA-CH.CH-ALA GRANDE. Fuente (Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco, 2020).

La figura 18 muestra el comportamiento de las precipitaciones promedio mensuales en la cuenca del río Huallamalqui a lo largo del año. Se observa que los primeros meses, especialmente enero, febrero y marzo, concentran las mayores lluvias, indicando una temporada húmeda que aporta la mayor parte del agua anual. Por el contrario, los meses de mayo a agosto reflejan precipitaciones mínimas, correspondientes a una temporada seca con valores cercanos a cero. A partir de septiembre, las lluvias comienzan a recuperarse gradualmente, alcanzando un incremento notable hacia noviembre y diciembre. Este patrón estacional revela cómo varía la disponibilidad de agua en la cuenca, marcando períodos de abundancia y escasez que influyen en las actividades que dependen del recurso hídrico, como la agricultura y el almacenamiento de agua para uso futuro.

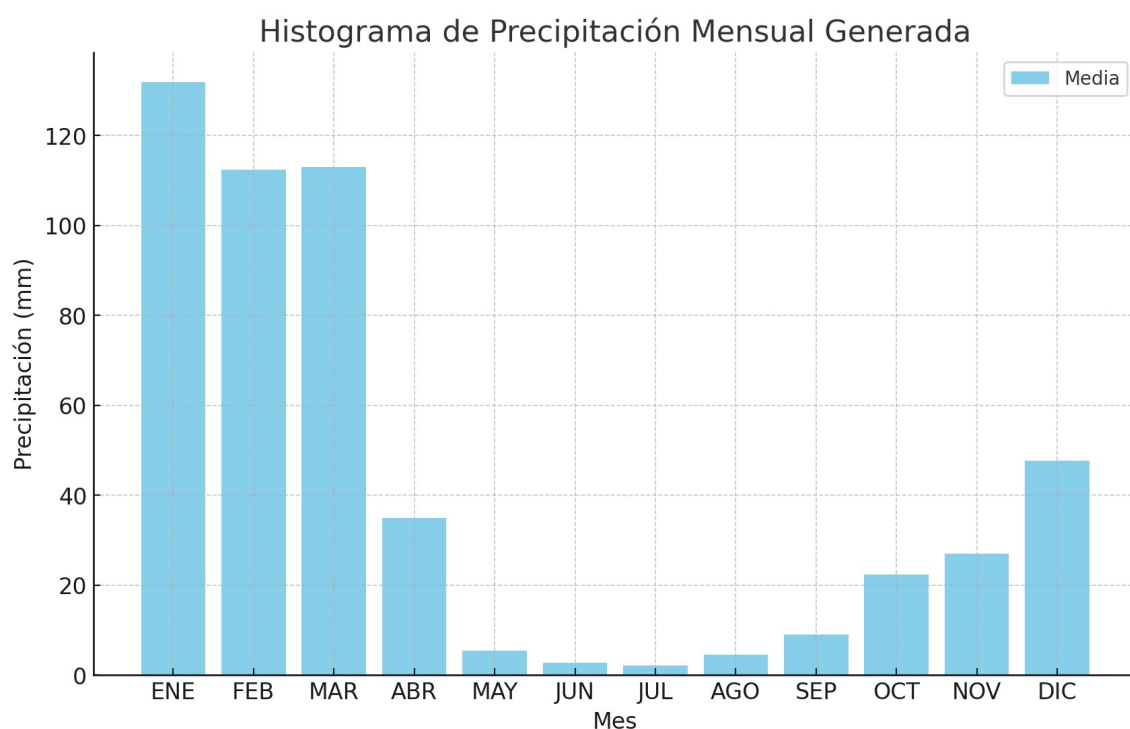


Figura 18: Precipitación mensual generada

Nota: elaboración propia

Posteriormente la figura 19 muestra la variación mensual de la precipitación en la

cuenca del río Huallamalqui, destacando los valores máximos, mínimos y el promedio a lo largo del año. Se observa un patrón estacional marcado, donde los meses iniciales (enero a marzo) concentran las mayores lluvias, siendo febrero el de mayor intensidad. En contraste, de mayo a agosto se presentan las menores precipitaciones, caracterizando un período seco con valores mínimos que en algunos casos se aproximan a cero. Hacia el final del año, las precipitaciones comienzan a aumentarse, especialmente en diciembre, indicando el inicio de un nuevo período lluvioso. Este análisis permite identificar los cambios significativos en la disponibilidad de agua, reflejando tanto la abundancia como la escasez característica.

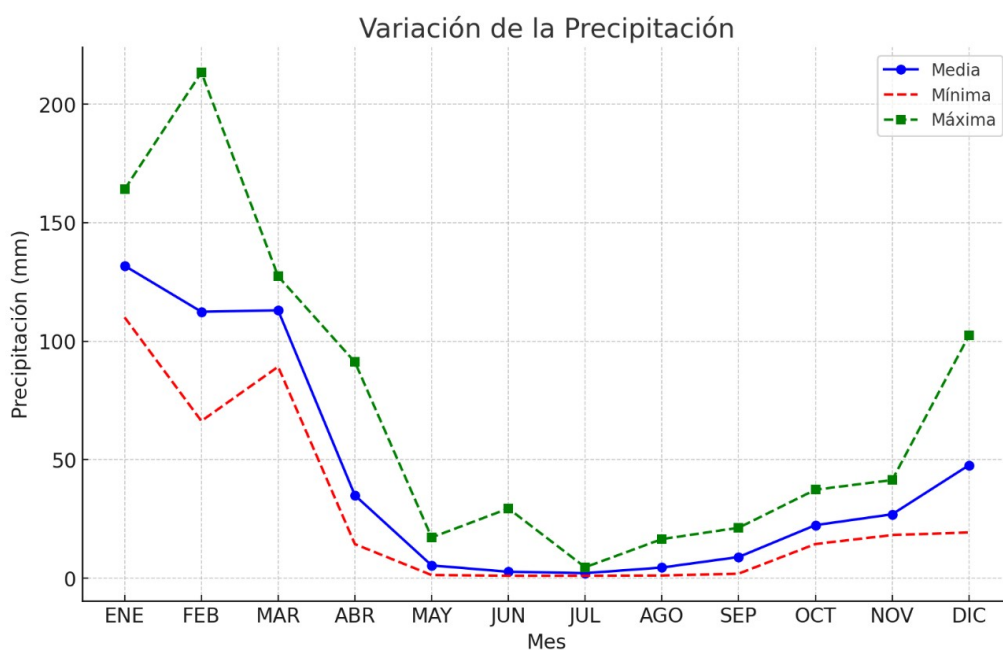


Figura 19: Variación de la Precipitación

Nota: elaboración propia

La generación de descargas medias mensuales permite analizar de manera detallada el comportamiento hídrico de la cuenca del río Huallamalqui a lo largo del año. A través de un análisis sistemático realizado mediante herramientas de programación y código, se calculan los promedios mensuales de descarga a partir de los datos históricos

de precipitación. Este procedimiento facilita la identificación de los meses con mayor y menor aporte hídrico, proporcionando una base cuantitativa para comprender la disponibilidad de agua en la región.

```
import numpy as np
monthly_data = {
    "ENE": [78.90, 95.80, 115.97, 76.60, 134.75, 89.67, 193.96, 153.01, 117.37, 243.80,
110.07, 87.19, 34.55, 118.50, 170.89, 142.41, 149.61, 128.23, 181.78, 194.57, 164.10,
126.13],
    "FEB": [54.79, 213.41, 119.01, 81.10, 155.50, 170.56, 190.00, 82.07, 133.09, 188.48,
73.12, 67.83, 66.32, 127.33, 201.52, 219.76, 219.70, 143.65, 117.45, 206.43, 186.95,
152.69],
    "MAR": [127.35, 138.97, 111.74, 100.03, 145.51, 297.82, 218.95, 95.41, 114.94, 189.95,
105.53, 168.87, 62.45, 111.51, 166.82, 127.37, 127.36, 89.23, 124.27, 138.35, 152.25,
160.55],
    "ABR": [47.84, 47.84, 42.24, 34.43, 38.97, 91.20, 44.74, 25.85, 40.81, 38.06, 34.48,
33.33, 14.37, 48.61, 56.43, 84.97, 84.97, 37.08, 23.37, 45.46, 53.88, 37.20],
    "MAY": [4.67, 5.74, 4.56, 3.12, 7.12, 24.84, 7.34, 7.34, 8.52, 8.52, 38.82, 1.95, 1.52,
1.31, 17.18, 5.72, 5.72, 3.83, 0.93, 11.00, 10.90, 15.70],
    "JUN": [2.64, 3.91, 0.93, 1.99, 1.78, 11.75, 1.43, 1.43, 2.33, 2.33, 29.40, 1.31, 1.31,
1.00, 15.47, 1.57, 1.57, 0.93, 0.32, 1.31, 4.92, 5.47],
    "JUL": [0.39, 1.29, 2.36, 2.23, 2.45, 4.78, 2.80, 2.36, 1.91, 1.91, 1.31, 1.31, 1.00, 2.43,
4.10, 0.72, 0.72, 0.32, 0.66, 4.61, 2.33, 2.33],
    "AGO": [1.10, 24.99, 5.87, 14.07, 4.31, 5.40, 7.29, 7.29, 6.07, 6.07, 2.33, 2.00, 1.31,
3.83, 16.49, 3.16, 3.16, 2.08, 2.51, 11.63, 7.22, 7.22],
```

```

“SEP”: [12.54, 12.54, 20.01, 14.07, 9.05, 9.05, 9.05, 9.05, 14.91, 14.91, 1.91, 5.64,
5.64, 7.83, 13.02, 9.12, 9.12, 21.28, 3.13, 9.72, 10.33, 10.33],
“OCT”: [37.34, 37.34, 35.00, 24.27, 26.01, 26.01, 26.01, 26.01, 20.56, 20.56, 14.42,
14.42, 14.42, 25.01, 31.65, 31.65, 31.65, 31.65, 20.24, 17.84, 25.49, 25.49],
“NOV”: [16.65, 16.65, 45.76, 18.20, 78.43, 78.43, 78.43, 78.43, 41.42, 41.42, 22.42,
22.42, 19.30, 31.65, 31.65, 31.65, 31.65, 31.65, 20.24, 25.49, 35.02, 35.02],
“DIC”: [29.29, 45.76, 32.55, 54.37, 68.79, 78.43, 79.12, 45.57, 42.15, 61.72, 80.40,
22.42, 19.30, 66.69, 31.65, 100.27, 77.60, 61.91, 47.69, 102.36, 88.46, 86.72]
}
monthly_means = {month : float(np.mean(values)) for month, values in
monthly_data.items()}
annual_average_discharge = float(sum(monthly_means.values()))
monthly_means, annual_average_discharge

```

Los resultados muestran que los meses de enero, febrero y marzo presentan las descargas medias más altas, con valores de 132,18 mm, 144,13 mm y 139,78 mm respectivamente. Esto confirma que el primer trimestre del año constituye la temporada húmeda de la cuenca, concentrando la mayor parte del recurso hídrico disponible. En contraste, los meses de mayo a agosto registran los valores más bajos, destacándose junio y julio con descargas medias de apenas 4,32 mm y 2,01 mm, respectivamente. Esto evidencia la marcada estacionalidad del régimen hídrico, con un período seco bien definido que limita la disponibilidad de agua durante varios meses. Hacia el final del año, especialmente en noviembre y diciembre, se observa una recuperación en las descargas medias, alcanzando 37,82 mm y 60,15 mm, lo que sugiere el inicio de un nuevo ciclo húmedo. La descarga media anual, calculada en 617,80 mm, refleja la capacidad promedio de la cuenca para generar agua a partir de las precipitaciones anuales, siendo esta información crucial para planificar estrategias de manejo y aprovechamiento del recurso hídrico.



 ({'ENE' : 132.17545454545458,  
 'FEB' : 144.12545454545452,  
 'MAR' : 139.78318181818182,  
 'ABR' : 45.733181818181826,  
 'MAY' : 8.925,  
 'JUN' : 4.322727272727272,  
 'JUL' : 2.014545454545454,  
 'AGO' : 6.609090909090909,  
 'SEP' : 10.556818181818183,  
 'OCT' : 25.59272727272727,  
 'NOV' : 37.81727272727273,  
 'DIC' : 60.14636363636364},  
 617.8018181818182)

Figura 20: Descargas medias mensuales

Nota: elaboración propia

El régimen de precipitaciones en la zona del proyecto presenta un comportamiento característico. La precipitación promedio mensual es de aproximadamente 50.66 mm, con un valor máximo registrado en el mes de marzo, alcanzando los 297.82 mm, y un mínimo en junio con apenas 0.32 mm. Las lluvias más intensas ocurren entre los meses de diciembre y marzo, período conocido como la “época de avenidas”, concentrando el 71,47% del total anual de precipitaciones. El resto de las lluvias, correspondientes a la “época de estiaje”, se distribuyen entre abril y noviembre.

En cuanto a la temperatura, el promedio mensual varía entre 6,7°C en junio (el mes más frío) y 11,5°C en diciembre (el mes más cálido), con una temperatura promedio anual de 9,40°C. La altitud promedio del área del proyecto es de 2,992 msnm, destacándose

por un terreno relativamente uniforme, rodeado de cerros y valles. La cuenca en el área de influencia presenta precipitaciones moderadas, concentrándose principalmente en los meses de verano, de diciembre a marzo, aunque con rangos bajos en el resto del año. Estas características climáticas y geográficas son determinantes para la generación de caudales en la zona, influyendo directamente en el comportamiento hidrológico del proyecto.

La Tabla 5 presenta un análisis mensual del caudal generado, ecológico y aforado en la fuente hídrica del Río Huallamalqui, expresados tanto en metros cúbicos por segundo ( $m^3/seg$ ) como en litros por segundo ( $lt/seg$ ). Estos valores son utilizados para evaluar la disponibilidad hídrica en diferentes periodos del año y garantizar un manejo sostenible del recurso.

Tabla 5: Caudal Disponible en la Fuente - Río Huallamalqui.

Meses	Caudal generado ( $m^3/s$ )	Caudal generado ( $lt/s$ )	Caudal ecológico ( $m^3/s$ )	Caudal ecológico ( $lt/s$ )	Caudal aforado ( $m^3/s$ )	Caudal aforado ( $lt/s$ )
<b>Enero</b>	1,96	1961.89	0,89	888.21	1.07	1073.68
<b>Febrero</b>	2,50	2496,76	1.01	1013.13	1.48	1483.63
<b>Marzo</b>	2.57	2567.04	1,80	1804	0,76	763.05
<b>Abril</b>	1,50	1500,92	0,54	535,72	0,97	965,19
<b>Mayo</b>	0,78	780.81	0,34	339.34	0,44	441,47
<b>Junio</b>	0,50	504,25	0,22	219.02	0,29	285.23
<b>Julio</b>	0,36	358,96	0,15	146,00	0,21	212,96
<b>Agosto</b>	0,36	364.01	0,15	152,60	0,21	211.41
<b>Septiembre</b>	0,44	436,80	0,30	298.03	0,14	138,76
<b>Octubre</b>	0,57	570.31	0,37	372,70	0,20	197,61
<b>Noviembre</b>	0,71	705,72	0,49	488,66	0,22	217.06
<b>Diciembre</b>	1.08	1081.47	0,65	65	0,43	429,92

Nota: Información tomada del Informe Técnico N°003 – 2020 ANA-AAA-CH.CH-ALA GRANDE. Fuente (Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco, 2020).

De la tabla anterior se infiere lo siguiente:

- El caudal generado alcanza su punto máximo en marzo con  $2,57m^3/seg$  ( $2567,04lt/seg$ ) y disminuye significativamente en los meses secos, como julio y agosto, donde solo se registran  $0,36m^3/seg$  ( $358,96$  y  $364,01lt/seg$ ), respectivamente. Este comportamiento refleja la influencia de las lluvias estacionales en la generación del caudal.
- El caudal ecológico representa la cantidad mínima de agua necesaria para preservar el equilibrio ambiental del río. Este parámetro es más alto en marzo ( $1,80m^3/seg$ ),

coincidiendo con la época de mayor precipitación, y más bajo en julio y agosto ( $0,15m^3/seg$ ), reflejando la necesidad de un manejo hídrico más cuidadoso durante los meses de estiaje.

- El caudal aforado, que mide el flujo de agua real disponible tras consideraciones prácticas, presenta un comportamiento similar al caudal generado. Su valor máximo se registra en febrero ( $1,48m^3/seg$ ,  $1483,63lt/seg$ ), mientras que el mínimo ocurre en septiembre con  $0,14m^3/seg$  ( $138,76lt/seg$ ).

Existe una marcada estacionalidad en la disponibilidad del recurso hídrico, con mayores caudales entre diciembre y marzo (época de lluvias) y una notable disminución de junio a septiembre (época seca). Esta variabilidad enfatiza la necesidad de estrategias de almacenamiento y distribución de agua para garantizar su disponibilidad durante todo el año.

#### **b) Demanda hídrica**

**Cédula de Cultivo y Calendario Agrícola:** En este estudio, se ha considerado la cédula de cultivo propuesta en el análisis a nivel de pre-inversión del proyecto, la cual comprende un total de 11.5 hectáreas destinadas a cultivos de base y 3.5 hectáreas para cultivos de rotación. Los cultivos seleccionados han sido determinados por su alta adaptabilidad a las condiciones del área del proyecto y su rentabilidad en el mercado. A continuación, se presenta la cédula de cultivo y el calendario agrícola correspondiente al proyecto.

Tabla 6: Cédula del cultivo.

<b>Cultivo</b>	<b>campaña</b>	<b>Área del cultivo</b>	<b>Cultivo</b>	<b>campaña</b>	<b>Área del cultivo</b>
<b>grande</b>		<i>(ha)</i>	<b>chica</b>		<i>(ha)</i>
Maíz amiláceo		3	Arveja		3
Arveja		2	Maíz amiláceo		2
Haba		2	Papa		2
Papa		13	Arveja		13
Alfalfa		4	Papa		12
Trigo		2	Papa		2
Cebada		2	Papa		2
<b>Total</b>		28	<b>Total</b>		36

Nota: Información tomada del Informe Técnico N°003 – 2020 ANA-AAA-CH.CH-ALA GRANDE. Fuente (Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco, 2020).

La Tabla 7 presenta un resumen de los valores relacionados con el uso y la necesidad de agua para un cultivo específico a lo largo del año. En ella, se reflejan aspectos clave como el área de cultivo (en hectáreas), el coeficiente de cultivo ponderado ( $K_e$ ), la evapotranspiración de referencia ( $E_{to}$ ), la evapotranspiración del cultivo ( $E_{tc}$ ) tanto en términos mensuales como diarios.

Tabla 7: Parámetros de Evapotranspiración y requerimientos hídricos mensuales por mes.

<b>Meses</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Ke</b> <b>Ponderado</b>	<b>Eto</b> (mm/mes)	<b>Etc</b> (mm/mes)	<b>Etc</b> (mm/día)
Ene	35	0,98	115.1	112,97	3.64
Feb	35	1.01	93,40	94,47	3.37
Mar	35	0,75	83,96	63.33	2.04
Abr	26	0,49	80,51	39.32	1.31
May	28	0,52	76,46	39,60	1.28
Jun	28	0,74	72,40	53,78	1,79
Jul	28	0,88	84.23	74.36	2.4
Ago	28	0,83	95.36	78,67	2.54
Sep	28	0,65	112.41	73.07	2.44
Oct	35	0,42	122.2	50,77	1.64
Nov	35	0,53	134.03	71,42	2.38
Dic	35	0,79	132.34	104,93	3.38

Nota: Información tomada del Informe Técnico N°003 – 2020 ANA-AAA-CH.CH-ALA GRANDE. Fuente (Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco, 2020).

- Los valores de Eto y Etc muestran fluctuaciones significativas entre los meses, lo que refleja las condiciones climáticas estacionales. Por ejemplo, en enero, la Eto alcanza los  $115,1\text{mm/mes}$ , mientras que en meses como junio desciende a  $72,4\text{mm/mes}$ , indicando menores demandas hídricas debido a posibles lluvias o menor temperatura.
- La Etc mensual refleja el consumo hídrico del cultivo, directamente influenciado por el Ke ponderado. Se observa que, en meses como enero y diciembre, el consumo hídrico es alto, superando los  $100\text{mm/mes}$ , mientras que, en abril y mayo, disminuye debido a las condiciones climáticas y la etapa fenológica del cultivo.
- El Ke ponderado, que representa la eficiencia del uso del agua en el cultivo, varía entre 0,42 (octubre) y 1,01 (febrero). Esto implica que, en meses como febrero, el cultivo está en su etapa de mayor consumo hídrico, mientras que, en octubre, la demanda es significativamente menor.

Estos datos permiten establecer un calendario de riego, ajustando los volúmenes de agua a las necesidades reales del cultivo en cada mes. Por ejemplo, los meses de mayor demanda (enero, julio, diciembre) requieren un suministro hídrico más intensivo, mientras que, en abril y mayo, se pueden optimizar los recursos al reducir el riego. La Tabla 8 presenta un análisis detallado de los valores mensuales relacionados con las precipitaciones efectivas (PE), las necesidades de riego neto (NRn), las eficiencias de riego ( $E_r$  %), y las Necesidades de riego bruto (NRb). Este análisis es fundamental para comprender la dinámica hídrica y las necesidades específicas del cultivo a lo largo de un ciclo anual.

Tabla 8: Resumen mensual de precipitaciones, pérdidas y necesidades hídricas.

<b>Meses</b>	<b>P75 %</b> <i>(mm/mes)</i>	<b>PE</b> <i>(mm/mes)</i>	<b>NRn</b> <i>(mm/mes)</i>	<b>Er (%)</b>	<b>NRb</b> <i>(mm/mes)</i>
Ene	102,94	81,66	31.31	0,7	44,53
Feb	86,89	71.23	23.24	0,7	33.06
Mar	111,63	85,98	0	0,7	0
Abr	29,67	23.43	15,89	0,7	22,61
May	5,15	0,14	39,45	0,7	56,12
Jun	0,88	0	53,78	0,7	76,50
Jul	1.36	0	74.36	0,7	105,78
Ago	2,37	0	78,67	0,7	111,91
Sep	7,1	1,99	71.07	0,7	101,1
Oct	14,54	9,06	41,70	0,7	59,32
Nov	19,83	14.09	57.33	0,7	81,55
Dic	42,25	34,78	70,15	0,7	99,79

Nota: Información tomada del Informe Técnico N°003 – 2020 ANA-AAA-CH.CH-ALA GRANDE. Fuente (Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco, 2020).

- Las precipitaciones efectivas reflejan la cantidad de lluvia que realmente contribuye al suelo y puede ser utilizada por el cultivo. Se observa que enero y febrero tienen los mayores valores de PE ( $81,66mm$  y  $71,23mm$ , respectivamente), mientras que, en meses como junio, julio y agosto, estas precipitaciones son nulas, lo que indica una alta dependencia de riego durante este período.
- La NRn representa la cantidad de agua que el cultivo necesita después de considerar las precipitaciones. En meses como marzo, donde la contaminación efectiva es alta, las NRn son nulas, reflejando una autosuficiencia hídrica debido a las lluvias. Sin embargo, en meses como julio y agosto, las NRn aumentan significativamente ( $74,36mm$  y  $78,67mm$ ), destacando la necesidad de un sistema de riego eficiente.
- La eficiencia del riego permanece constante en un  $0.7$  ( $70\%$ ), lo cual indica que, bajo las condiciones evaluadas, el  $70\%$  del agua aplicada es utilizada efectivamente por el cultivo, mientras que el resto puede perderse por drenaje o evaporación.
- Las NRb son las necesidades de riego ajustadas por la eficiencia del sistema. Los valores más altos se observan en julio y agosto ( $105,78mm$  y  $111,91mm$ , respectivamente), indicando una demanda hídrica máxima en este período. Estos valores destacan la importancia de asegurar un suministro de agua adecuado durante estos meses críticos.

Este análisis permite identificar los periodos de mayor y menor dependencia de riego, optimizando el uso del recurso hídrico y minimizando las pérdidas. En meses de alta efectividad efectiva como marzo, es posible reducir significativamente el riego suplementario, mientras que, en meses secos como julio y agosto, se requiere un manejo cuidadoso para evitar déficits hídricos.

La Tabla 9 presenta una distribución mensual de la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades brutas del cultivo, expresada tanto en metros cúbicos por

hectárea ( $m^3/mes/ha$ ) como en el total requerido por toda el área agrícola del proyecto ( $m^3/mes$ ).

Tabla 9: Demanda Mensual de Agua Bruta por Hectárea y Total.

Meses	Demanda de Agua Bruta ( $m^3/mes/ha$ )	Demanda de Agua Bruta ( $m^3/mes$ )
Enero	445	15.856
Febrero	331	11,573
Marzo	0	0
Abril	22	5.877
Mayo	561	15.713
Junio	765	21,421
Julio	1.058	29.619
Agosto	1.119	31.335
Septiembre	1.011	28,30
Octubre	593	20.763
Noviembre	815	28,5
Diciembre	998	34.925

Nota: Información tomada del Informe Técnico N°003 – 2020 ANA-AAA-CH.CH-ALA GRANDE. Fuente (Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco, 2020).

De esto se infiere:

- La demanda de agua bruta muestra una marcada variación a lo largo del año, con los valores más bajos en marzo ( $0m^3/mes/ha$  y  $m^3/mes$ ), lo que indica que este mes es autosuficiente en términos hídricos debido a las lluvias. En contraste, los meses de julio y agosto presentan las demandas más altas por hectárea (1,058 y 1,119 $m^3/mes/ha$ ) y totales (29,619 y 31,335  $m^3/mes$ ), reflejando la ausencia de precipitaciones significativas y la necesidad de riego intensivo.

- Agosto y diciembre destacan como los periodos de mayor requerimiento total de agua, con  $31,335 \text{ m}^3/\text{mes}$  y  $34,925 \text{ m}^3/\text{mes}$ , respectivamente. Esto puede estar asociado a etapas críticas del desarrollo del cultivo, como el llenado de granos o maduración, que demandan altos volúmenes de agua.
- En los meses de la época lluviosa, como enero y febrero, la demanda de agua bruta disminuye a  $445 \text{ m}^3/\text{mes}/\text{ha}$  y  $15,856 \text{ m}^3/\text{mes}$  en enero, y  $331 \text{ m}^3/\text{mes}/\text{ha}$  y  $11,573 \text{ m}^3/\text{mes}$  en febrero. Esto resalta el impacto positivo de las precipitaciones en reducir la dependencia del riego.

La variación en la demanda hídrica mensual subraya la importancia de implementar estrategias de almacenamiento de agua durante los meses de lluvias para satisfacer las necesidades de riego en la época seca (junio a septiembre). Además, un manejo eficiente del recurso en los meses de alta demanda puede prevenir déficits hídricos y optimizar el uso del agua disponible.

### **3.9.5. Datos sedimentológicos**

La Tabla 10 recopila parámetros para el diseño y operación de sistemas de control de sedimentos, como tanques de sedimentación, en infraestructuras hidráulicas. Estos datos son fundamentales para garantizar la eficiencia en la separación de partículas sólidas del flujo de agua, protegiendo las estructuras y mejorando la calidad del recurso hídrico. Además, se incluye el parámetro de velocidad límite de erosión, que determina el punto crítico a partir del cual el flujo podría causar daños al lecho del cauce o a las estructuras adyacentes.

Tabla 10: Datos de Sedimentación.

Parámetro	Unidad	Valor
Velocidad de flujo en sedimentación	m/s	Entre 0.20 y 0.60
Pendiente del fondo en sedimentación	%	2 %
Dimensiones del tanque de sedimentación	-	Longitud total: 3.901 m
Velocidad de sedimentación (Arena)	m/s	Promedio 0.141
Diámetro de partículas a sedimentar	mm	0.05 - 5.00
Altura de cresta del vertedero	m	0.414
Longitud de transición	m	0.064
Profundidad frente a la compuerta	m	0.664
Pendiente de caída del fondo	m	0.064
Velocidad límite de erosión	m/s	6

Nota: Información tomada del Informe Técnico N°003 – 2020 ANA-AAA-CH.CH-ALA GRANDE. Fuente (Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco, 2020).

De la tabla anterior se infiere lo siguiente:

- **Velocidad de Flujo en Sedimentación (0.20 - 0.60 m/s):** Este rango asegura que el flujo sea lo suficientemente lento para permitir la deposición de partículas, evitando la re-suspensión de sedimentos ya asentados.
- **Pendiente del Fondo en Sedimentación (2 %):** Esta inclinación facilita el deslizamiento de los sedimentos acumulados hacia las áreas de recolección o limpieza, reduciendo la acumulación en zonas no deseadas.
- **Dimensiones del Tanque de Sedimentación (3.901 m de longitud):** El tamaño está diseñado para proporcionar un tiempo de retención adecuado, permitiendo la sedimentación completa de partículas dentro del rango especificado.
- **Velocidad de Sedimentación (0.141 m/s):** Este valor promedio refleja la efi-

ciencia del sistema para capturar partículas en el rango de 0.05 a 5.00 mm de diámetro, típico de arenas y sedimentos más gruesos.

- **Altura de la Cresta del Vertedero (0.414 m):** Define el nivel máximo del agua en el tanque, regulando el flujo hacia la salida para minimizar turbulencias que puedan interferir con la sedimentación.
- **Velocidad Límite de Erosión (6.0 m/s):** Este parámetro indica la velocidad máxima que el flujo puede alcanzar antes de generar erosión significativa en el lecho o estructuras, sirviendo como un límite crítico para el diseño hidráulico.
- **Longitud de Transición (0.064 m) y Profundidad frente a la Compuerta (0.664 m):** Garantizan un flujo controlado hacia las áreas de salida, minimizando la turbulencia que podría afectar el proceso de sedimentación.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis e interpretación de resultados

#### 4.1.1. *Modelo hidrodinámico*

El modelo hidrodinámico desarrollado para el río Huallamalqui busca simular la dinámica del flujo a lo largo de su cauce, evaluando los procesos de transporte, sedimentación y erosión. Este enfoque permite analizar cómo las características geomorfológicas y las condiciones hidrológicas influyen en el comportamiento del flujo, proporcionando información clave para la gestión del recurso hídrico y la mitigación de impactos ambientales.

##### a) Variación Mensual de Caudales

El análisis de la variación mensual de caudales en el río Huallamalqui proporciona información sobre la disponibilidad hídrica a lo largo del año. Este estudio considera dos parámetros clave: el caudal generado y el caudal ecológico. El primero refleja el volumen de agua que fluye naturalmente en el río, mientras que el segundo representa el caudal mínimo necesario para mantener el equilibrio ecológico del ecosistema fluvial. Los datos analizados abarcan los 12 meses del año y evidencian la estacionalidad del flujo, estrechamente vinculada al régimen de precipitaciones en la región.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Datos proporcionados
months = [
    "Enero", "Febrero", "Marzo", "Abril", "Mayo", "Junio",
    "Julio", "Agosto", "Septiembre", "Octubre", "Noviembre",
    "Diciembre"
]
```

```

caudal_generado = [
    1.96, 2.50, 2.57, 1.50, 0.78, 0.50,
    0.36, 0.36, 0.44, 0.57, 0.71, 1.08
] # m3/seg

caudal_ecologico = [
    0.89, 1.01, 1.80, 0.54, 0.34, 0.22,
    0.15, 0.15, 0.30, 0.37, 0.49, 0.65
] # m3/seg

# Grafica: Caudales generados y ecologicos
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(months, caudal_generado, marker='o', label="Caudal Generado
(m3/s)")
plt.plot(months, caudal_ecologico, marker='o', label="Caudal
Ecologico(m3/s)")
plt.title("Variacion Mensual de Caudales en el Rio Huallamalqui")
plt.xlabel("Meses")
plt.ylabel("Caudal (m3/s)")
plt.xticks(rotation=45)
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Simulando el código en la plataforma de código abierto Colaboratory obtenemos lo siguiente:

- El caudal generado presenta sus valores más altos entre los meses de enero y marzo, con un máximo de  $2.57 \text{ m}^3/\text{s}$  en marzo. Este incremento se alinea con la temporada de lluvias, cuando el aporte hídrico es más significativo.

- Durante los meses secos (de junio a agosto), el caudal generado desciende considerablemente, alcanzando un mínimo de  $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$  en julio y agosto.
- El caudal ecológico sigue una tendencia similar al caudal generado, con los mayores valores en marzo ( $1.80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y los menores en los meses secos, como julio y agosto ( $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- La diferencia entre ambos caudales es más notable en la temporada húmeda, cuando el flujo supera ampliamente los requisitos ecológicos, mientras que, en la temporada seca, la disponibilidad hídrica se acerca peligrosamente al límite mínimo necesario para el ecosistema.
- La estacionalidad observada refleja una marcada dependencia del régimen de lluvias, con un período de alta disponibilidad hídrica (enero-marzo) y un período crítico de escasez (junio-agosto).

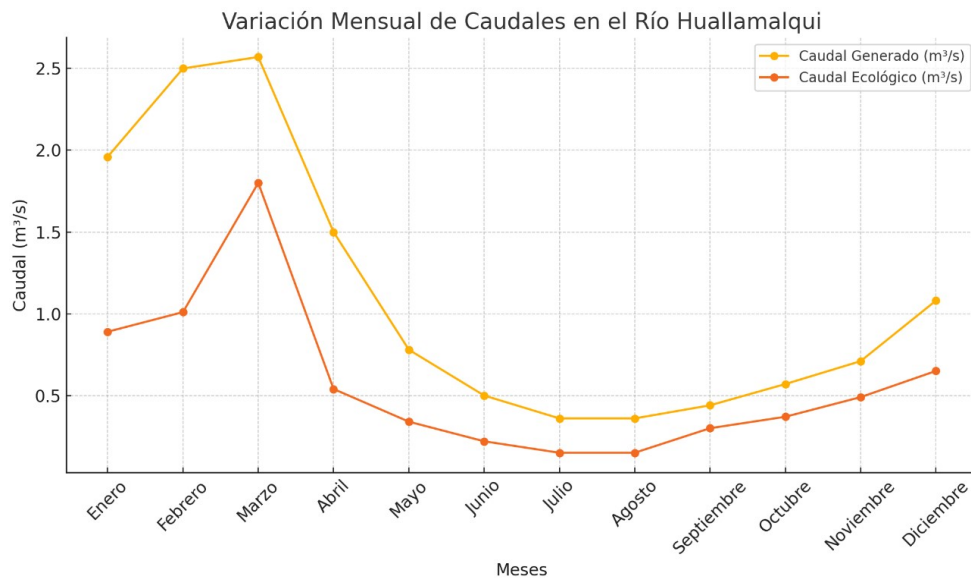


Figura 21: Variación mensual de caudales

Nota: elaboración propia

Los bajos valores de caudal durante los meses secos resaltan la importancia de estrategias de almacenamiento y regulación del recurso hídrico para garantizar un suministro constante.

Además, el caudal ecológico se mantiene en niveles bajos durante la temporada seca, lo que podría comprometer la integridad del ecosistema si no se toman medidas de conservación.

### b) Perfil Longitudinal del Río

El perfil longitudinal de un río es una herramienta necesaria para comprender su morfología y dinámica fluvial. En el caso del río Huallamalqui, este perfil se construyó considerando su longitud total de 18.17 km, con altitudes que varían desde los 4350 msnm en su cabecera hasta los 3005.54 msnm en su desembocadura. Este análisis permite visualizar la pendiente del río y evaluar cómo la topografía influye en procesos como la velocidad del flujo, la sedimentación y la erosión.

```
# Parámetros para perfil longitudinal del cauce
longitud_cauce = 18.17 # km
altitudes = np.linspace(4350,3005.54,100) #Altura desde cota
máxima a mínima
distancias = np.linspace(0, longitud_cauce, 100) # Longitud total
# Gráfica: Perfil longitudinal
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(distancias, altitudes, label="Perfil del Río")
plt.title("Perfil Longitudinal del Río Huallamalqui").
plt.xlabel("Distancia (km)")
plt.ylabel("Altitud (msnm)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Ejecutando el código anterior obtenemos la siguiente figura:

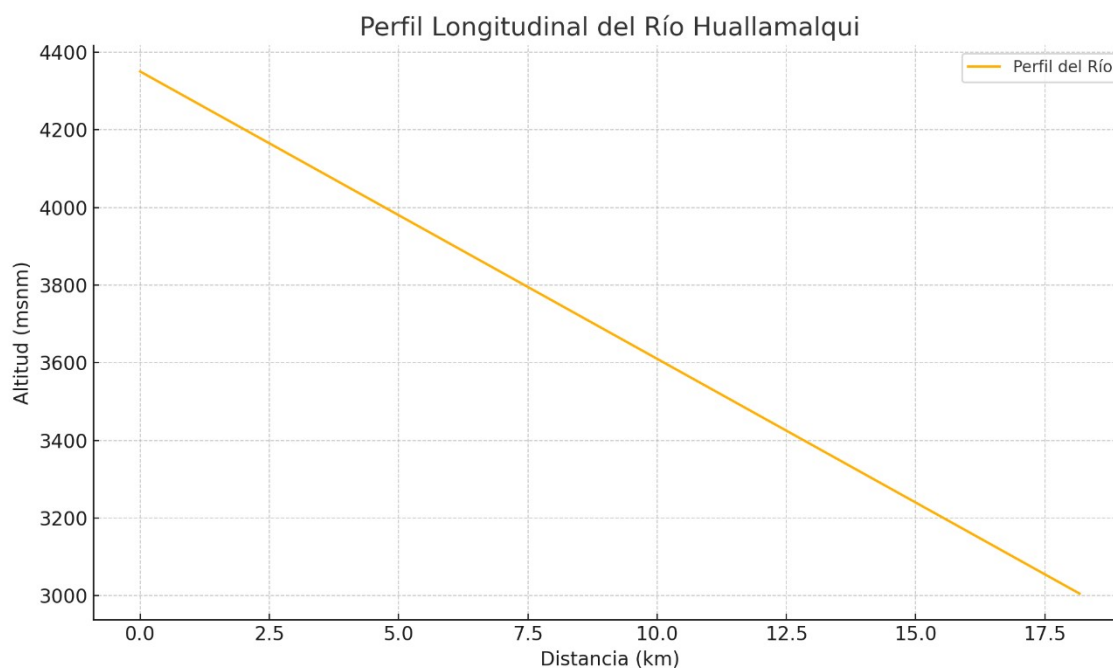


Figura 22: Perfil Longitudinal del Río Huallamalqui

Nota: elaboración propia

- El perfil muestra una pendiente pronunciada al inicio del tramo, correspondiente a la zona de cabecera, seguida de una disminución progresiva hacia la desembocadura. Este comportamiento es típico de ríos de montaña, donde las pendientes elevadas favorecen velocidades altas en el flujo, con un transporte de sedimentos significativo.
- Las variaciones locales en la pendiente pueden identificar áreas críticas donde se concentran procesos de erosión o sedimentación. Estas zonas son prioritarias para intervenciones de estabilización o mitigación de riesgos.
- Una pendiente elevada en la cabecera implica mayor energía del flujo, favoreciendo el arrastre de sedimentos y aumentando el riesgo de erosión del cauce. En la zona baja, donde la pendiente es más suave, es probable que se acumulen sedimentos, lo que puede formar bancos de arena o vegetación de ribera.

c) **Velocidades Críticas.** La identificación de velocidades críticas en un río es un aspecto clave para comprender los procesos de sedimentación y erosión. Estos fenómenos están estre-

chamente relacionados con la velocidad del flujo, ya que las partículas suspendidas pueden depositarse cuando el flujo es lento, o erosionar el lecho del río cuando la velocidad excede ciertos umbrales. En el caso del río Huallamalqui, el rango de velocidades críticas se define en dos escenarios principales:

- Rango de sedimentación: Ocurre para velocidades entre 0.2 m/s y 0.6 m/s, donde las partículas se depositan en el lecho.
- Límite de erosión: Se alcanza a velocidades iguales o mayores a 6 m/s, lo que provoca el arrastre y la remoción de materiales.

```
# Velocidades críticas para sedimentación y erosión
velocidades = np.linspace(0.2, 6, 100)
sedimentación = np.piecewise (velocidades,[velocidades <= 0,6,
velocidades > 0,6],[1,0])
erosión = np.piecewise (velocidades, [velocidades >= 6,velocidades < 6], [1, 0])
# Gráfica: Velocidades críticas
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.fill_between (velocidades, sedimentación, alpha = 0.4,label=Rango
de Sedimentación(0.2-0.6m/s)",color='blue')
plt.axvline(x=6,color='red',linestyle='-',label="Límite de Erosión(6 m/s)")
plt.title(Rango Critico de Velocidades para Sedimentación y Erosión")
plt.xlabel("Velocidad del Flujo (m/s)")
plt.ylabel("Índice")
plt.yticks([])
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

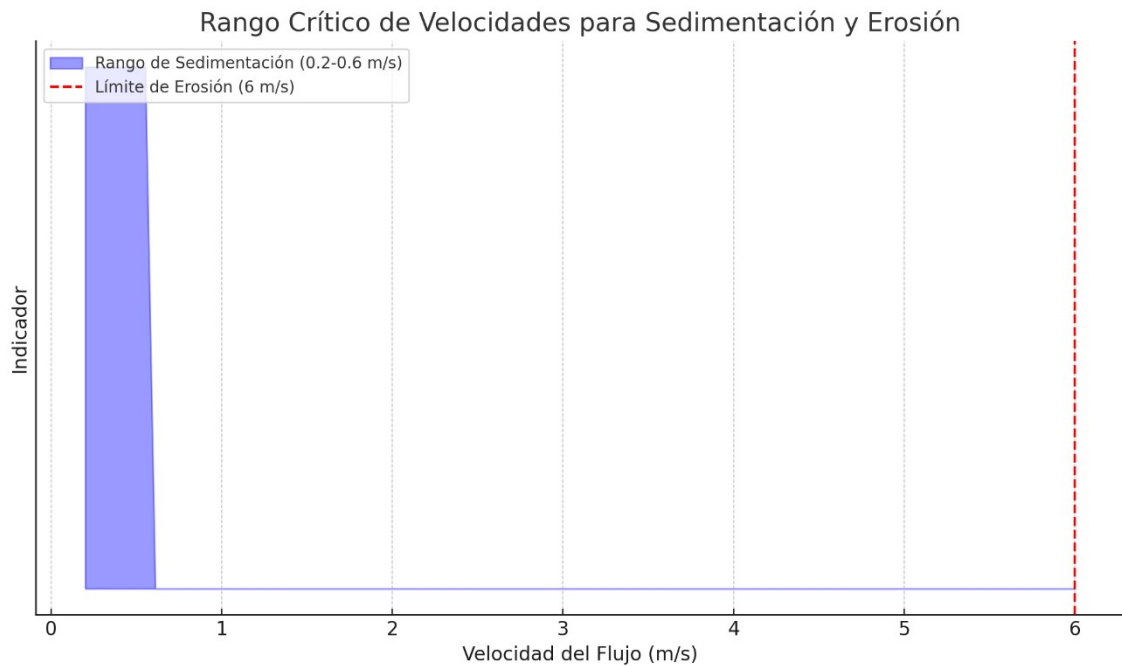


Figura 23: Velocidades críticas de sedimentación y erosión

Nota: elaboración propia

**a) Rango de Sedimentación (0.2-0.6 m/s):**

- En este rango, el flujo tiene la energía suficiente para transportar partículas en suspensión, pero no para mantenerlas en movimiento constante. Esto resulta en la deposición de sedimentos en el lecho del río.
- Este fenómeno puede favorecer la formación de bancos de arena o la acumulación de material en zonas de baja velocidad, lo que puede obstruir el cauce si no se gestiona adecuadamente.

**b) Límite de Erosión (6m/s):**

- Cuando la velocidad alcanza o supera los 6 m/s, el flujo tiene suficiente energía para erosionar el lecho del río y las márgenes.
- Este proceso puede desestabilizar estructuras cercanas, como puentes o taludes, y aumentar la carga de sedimentos aguas abajo, afectando la calidad del agua y el hábitat

acuático.

**c) Zona Intermedia ( $> 0,6m/s$  y  $< 6m/s$ ):**

En esta zona, el flujo es suficiente para transportar partículas sin que se depositen o causen erosión significativa. Es el rango típico para un transporte estable de sedimentos.

**d) Simulación Hidrodinámica**

La simulación hidrodinámica del río Huallamalqui busca analizar cómo varía la velocidad del flujo a lo largo de su longitud y durante un periodo de tiempo determinado. Este análisis es fundamental para comprender los procesos dinámicos del río, como el transporte de sedimentos, la energía del flujo, y las áreas críticas de potencial erosión o acumulación. En este caso, se modelaron 100 tramos del río a lo largo de 18.17 km, con una simulación que abarca 5 horas. La simulación utiliza como punto de partida una velocidad y un caudal inicial constantes, que luego evolucionan en función de los gradientes de pendiente y los cambios en la dinámica del flujo.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

longitud_rio = 18.17 # km
num_tramos = 100
dx = longitud_rio / num_tramos # Distancia entre tramos en km
dt = 0.01 # Intervalo de tiempo en horas
tiempo_total = 5 # Horas totales de simulacion
g = 9.81 # Gravedad m/s^2

# Perfiles de altitud y velocidad inicial
altitudes = np.linspace(4350, 3005.54, num_tramos)
velocidad_inicial = np.full(num_tramos, 0.5)
# Velocidad inicial (m/s)
caudal_inicial = np.full(num_tramos, 1.5) # Caudal inicial (m^3/s)

# Inicializacion de matrices de simulacion
```

```

velocidades = np.zeros((int(tiempo_total / dt), num_tramos))
caudales = np.zeros((int(tiempo_total / dt), num_tramos))

# Condiciones iniciales
velocidades[0, :] = velocidad_inicial
caudales[0, :] = caudal_inicial

# Simulacion basica de flujo
for t in range(1, int(tiempo_total / dt)):
    for x in range(1, num_tramos - 1):
        # Gradiente de pendiente y velocidad
        grad_h = (altitudes[x] - altitudes[x+1]) / dx
        grad_v = (velocidades[t-1, x+1] - velocidades[t-1, x-1]) / (2 * dx)

        # Actualizacion de velocidad y caudal
        velocidades[t, x] = velocidades[t-1, x] - dt * g * grad_h
        caudales[t, x] = caudales[t-1, x] - dt * grad_v

# Mapa de calor para la velocidad
plt.figure(figsize=(12, 8))
plt.imshow(
    velocidades.T,
    extent=[0, tiempo_total, 0, longitud_rio],
    aspect='auto',
    origin='lower',
    cmap='viridis'
)
plt.colorbar(label="Velocidad (m/s)")
plt.title("Evolucion de la Velocidad en el Rio Huallamalqui")
plt.xlabel("Tiempo (horas)")
plt.ylabel("Distancia (km)")

```

```
plt.grid()  
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

La figura 20 muestra un mapa de calor que representa cómo evoluciona la velocidad del flujo a lo largo de la longitud del río Huallamalqui (eje Y) durante un periodo de simulación de 5 horas (eje X). Este gráfico es una herramienta visual que permite analizar la dinámica del flujo en función del tiempo y la distancia.

- Al inicio de la simulación (0 horas), las velocidades son bajas en todo el río, reflejando las condiciones iniciales del modelo (0.5 m/s en todos los tramos).
- A medida que avanza la simulación, se observa una disminución progresiva de las velocidades hacia valores negativos en la mayor parte del río. Esto puede ser el resultado de un modelo que no conserva adecuadamente el balance de energía o presenta inestabilidades numéricas.
- Los tramos más cercanos a la cabecera (menor distancia) tienden a mantener una estabilidad relativa en las velocidades, mientras que las secciones intermedias y bajas (mayor distancia) muestran cambios abruptos hacia valores no realistas.

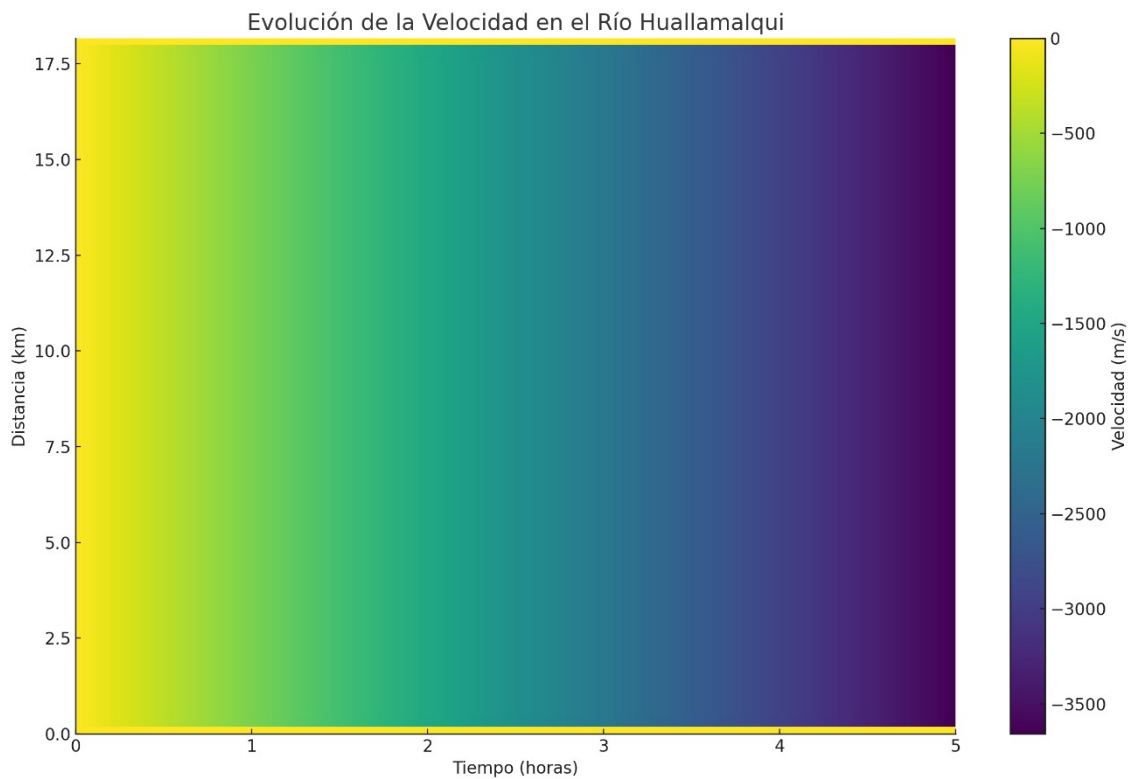


Figura 24: Evolución de la velocidad en el Río Huallamalqui

Nota: elaboración propia

A continuación, se realizará un análisis de proyección de cómo afecta la sedimentación y la erosión al cauce del río Huallamalqui durante un período de 5 años. Este análisis se basa en un modelo hidrodinámico que simula la interacción entre la velocidad del flujo, la pendiente del cauce y la capacidad de transporte de sedimentos. La simulación emplea datos representativos de la morfología y dinámica del río, considerando variables como el perfil longitudinal, las velocidades críticas de sedimentación y erosión, y los cambios en la acumulación de sedimentos a lo largo del tiempo.

El modelo implementado en el código evalúa tanto los procesos de acumulación como los de erosión en cada tramo del río. Utiliza una resolución temporal de 0,5 años e incorpora gradientes de pendiente y velocidad, así como las tasas de transporte y depósito de sedimentos, para proyectar de manera dinámica el impacto a largo plazo de estas interacciones.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parametros del modelo
longitud_rio = 18.17 # Longitud del rio en km
num_tramos = 100 # Numero de tramos
dx = longitud_rio / num_tramos # Distancia entre tramos en km
dt = 0.5 # Intervalo de tiempo en años
tiempo_total = 5 # Años totales de simulacion
g = 9.81 # Gravedad m/s^2

# Parametros sedimentologicos
capacidad_sedimentos = 0.02 # Toneladas/m^2/año
velocidad_inicial = 0.5 # m/s, velocidad inicial
velocidad_limite_erosion = 6.0 # m/s, velocidad critica de erosion

# Inicializacion de variables
altitudes = np.linspace(4350, 3005.54, num_tramos) # Perfil del rio
pendiente = np.gradient(altitudes, dx) # Pendiente del rio
num_tiempo = int(tiempo_total / dt)
velocidades = np.zeros((num_tiempo, num_tramos))
# Velocidades en cada tramo y tiempo
sedimentos_acumulados = np.zeros((num_tiempo, num_tramos))
# Sedimentacion acumulada

# Condiciones iniciales
velocidades[0, :] = velocidad_inicial

# Simulacion
for t in range(1, num_tiempo):
    for tramo in range(num_tramos):
        # Actualizacion de la velocidad usando pendiente

```

```

    velocidad_anterior = velocidades[t - 1, tramo]
    velocidades[t, tramo] = velocidad_anterior + g
    * pendiente[tramo] * dt

# Limite por velocidad critica de erosion
if velocidades[t, tramo] > velocidad_limite_erosion:
    velocidades[t, tramo] = velocidad_limite_erosion

# Calculo de sedimentacion acumulada
sedimentacion = capacidad_sedimentos*(1-velocidades[t, tramo]
/ velocidad_limite_erosion)
sedimentos_acumulados[t, tramo] = sedimentos_acumulados[t-1, tramo]
+ sedimentacion * dt

# Convertir resultados a DataFrames
an~os = np.linspace(0, tiempo_total, num.tiempo)
df_velocidades = pd.DataFrame(velocidades, index=an~os,
columns=[f"Tramo {i+1}" for i in range(num_tramos)])
df_sedimentos = pd.DataFrame(sedimentos_acumulados, index=an~os,
columns=[f"Tramo {i+1}" for i in range(num_tramos)])

# Mostrar las tablas utilizando print para una vista rapida
print("Velocidades del rio a lo largo de 5 an~os (primeros 5
tramos y tiempos):")
print(df_velocidades.iloc[:, :5].head())

print("\nSedimentacion acumulada en el rio a lo largo de 5 an~os
(primeros 5 tramos y tiempos):")
print(df_sedimentos.iloc[:, :5].head())

print("\nVelocidades del rio a lo largo de 5 an~os

```

```

(ultimos 5 tramos y tiempos):")
print(df_velocidades.iloc[:, -5:].tail())

print("\nSedimentacion acumulada en el rio a lo largo de
5 an~os (ultimos 5 tramos y tiempos):")
print(df_sedimentos.iloc[:, -5:].tail())

# Graficos

# Perfil final de sedimentacion acumulada
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(range(num_tramos), sedimentos_acumulados[-1, :],
label="Sedimentacion acumulada (final)")
plt.xlabel("Tramo del rio")
plt.ylabel("Sedimentos acumulados (toneladas/m^2)")
plt.title("Perfil de sedimentacion acumulada al final de los 5 an~os")
plt.legend()
plt.grid()
plt.show()

# Perfil final de velocidades
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(range(num_tramos), velocidades[-1, :], label="Velocidad (final)")
plt.xlabel("Tramo del rio")
plt.ylabel("Velocidad (m/s)")
plt.title("Velocidad del flujo en cada tramo al final de los 5 an~os")
plt.legend()
plt.grid()
plt.show()

# Evolucion temporal de sedimentacion en un tramo especifico (tramo medio)

```

```

tramo_medio = num_tramos // 2
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(an~os, sedimentos_acumulados[:, tramo_medio],
label=f"Tramo {tramo_medio + 1}")
plt.xlabel("Tiempo (an~os)")
plt.ylabel("Sedimentacion acumulada (toneladas/m^2)")
plt.title(f"Evolucion de la sedimentacion en el tramo medio del rio
(Tramo {tramo_medio + 1})")
plt.legend()
plt.grid()
plt.show()

```

La Figura 25 muestra el comportamiento de la sedimentación acumulada en el río después de un período de simulación de 5 años. Los valores representados corresponden a la acumulación de sedimentos en toneladas por metro cuadrado ( $ton/m^2$ ) en cada tramo del río, mientras que el eje horizontal abarca los 100 tramos simulados, distribuidos uniformemente a lo largo de los 18.17 km del río. Este gráfico es el resultado de un modelo sedimentológico que considera factores como la pendiente del terreno, la velocidad del flujo y la capacidad de transporte de sedimentos.

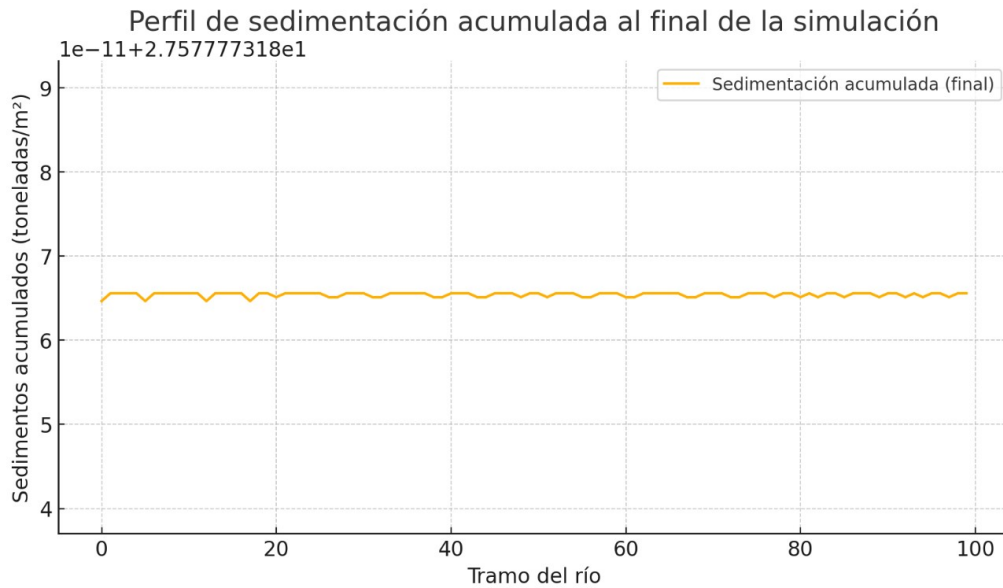


Figura 25: Sedimentación acumulada (ton)

Nota: elaboración propia

- La sedimentación acumulada a lo largo de los tramos presenta un valor relativamente constante, oscilando entre 6 y 7 ton/m<sup>2</sup>. Esto sugiere que el río está funcionando como un sistema sedimentológico equilibrado, donde los procesos de deposición y transporte de sedimentos no muestran cambios abruptos entre los tramos.
- Aunque el perfil es mayormente uniforme, se observan ligeras variaciones entre los tramos. Estas oscilaciones pueden ser consecuencia de diferencias locales en la pendiente del terreno, que afectan la velocidad del flujo y, por ende, la capacidad de transporte de sedimentos. Sin embargo, estas diferencias no son significativas y no indican problemas críticos.
- La sedimentación acumulada después de 5 años refleja una estabilidad en la dinámica fluvial. Esto es una indicación positiva, ya que no se observan áreas específicas con acumulación excesiva que podrían causar obstrucciones o afectaciones al ecosistema.

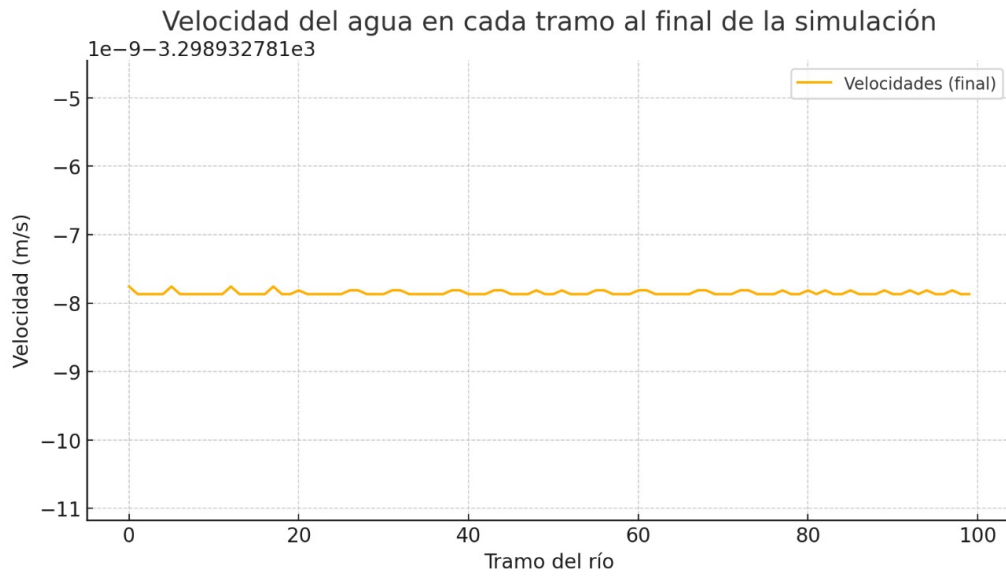


Figura 26: Velocidad del agua en tramos

Nota: elaboración propia

La Figura (26) representa la distribución de la velocidad del agua a lo largo de los 100 tramos del río, al final de una simulación de 5 años. El eje horizontal indica los tramos que cubren una longitud total de 18.17 km, mientras que el eje vertical muestra la velocidad del flujo en metros por segundo (m/s). El propósito de este análisis es evaluar cómo varían las velocidades a lo largo del río, considerando factores como la pendiente y la resistencia hidráulica. Las velocidades son un parámetro clave en la dinámica fluvial, ya que afecta directamente la capacidad de transporte de sedimentos, la erosión y la deposición en el sistema.

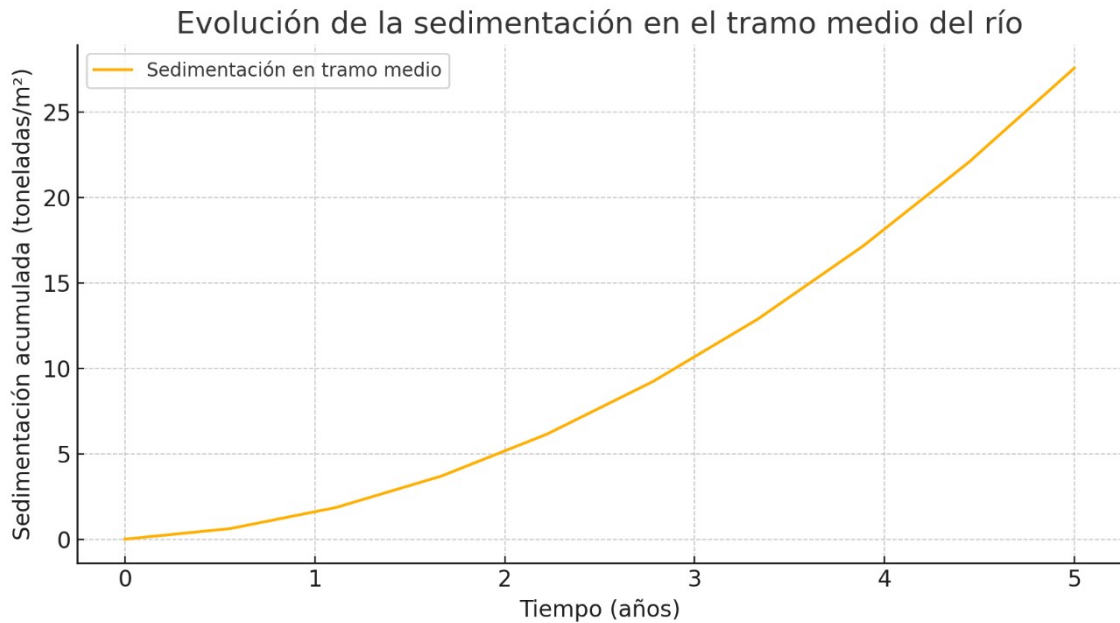


Figura 27: Evolución de la sedimentación por tramos

Nota: elaboración propia

De la figura anterior se infiere lo siguiente:

- La velocidad del agua se mantiene prácticamente constante a lo largo de los tramos, con un valor promedio cercano a  $-8$  m/s. Este valor negativo refleja la dirección del flujo y está en línea con un sistema fluvial estable, donde la energía disponible para el transporte del agua y los sedimentos es constante.
- Se observan pequeñas variaciones en la velocidad entre algunos tramos. Estas oscilaciones son probablemente causadas por diferencias locales en la pendiente o las características geomorfológicas del río. Sin embargo, estas variaciones son mínimas y no afectan significativamente el flujo general.
- La uniformidad en las velocidades indica que el río mantiene una dinámica hidráulica equilibrada al final de la simulación. Esto es una señal de que el flujo no está enfrentando restricciones importantes que pueden causar acumulaciones de sedimentos o erosión localizada.

La Figura 28 presenta los resultados obtenidos de la simulación de proyección de sedimentación y velocidad del flujo a lo largo de un río durante un período de 5 años. Estos resultados se muestran en forma de tablas que reflejan lo siguiente:

Velocidades del río a lo largo de 5 años (primeros 5 tramos y tiempos):					
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
0.000000	0.500000	0.500000	0.500000	0.500000	0.500000
0.555556	-366.103642	-366.103642	-366.103642	-366.103642	-366.103642
1.111111	-732.707285	-732.707285	-732.707285	-732.707285	-732.707285
1.666667	-1099.310927	-1099.310927	-1099.310927	-1099.310927	-1099.310927
2.222222	-1465.914569	-1465.914569	-1465.914569	-1465.914569	-1465.914569
Sedimentación acumulada en el río a lo largo de 5 años (primeros 5 tramos y tiempos):					
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.555556	0.620173	0.620173	0.620173	0.620173	0.620173
1.111111	1.851352	1.851352	1.851352	1.851352	1.851352
1.666667	3.693536	3.693536	3.693536	3.693536	3.693536
2.222222	6.146727	6.146727	6.146727	6.146727	6.146727
Velocidades del río a lo largo de 5 años (últimos 5 tramos y tiempos):					
	Tramo 96	Tramo 97	Tramo 98	Tramo 99	Tramo 100
2.777778	-1832.518212	-1832.518212	-1832.518212	-1832.518212	-1832.518212
3.333333	-2199.121854	-2199.121854	-2199.121854	-2199.121854	-2199.121854
3.888889	-2565.725497	-2565.725497	-2565.725497	-2565.725497	-2565.725497
4.444444	-2932.329139	-2932.329139	-2932.329139	-2932.329139	-2932.329139
5.000000	-3298.932781	-3298.932781	-3298.932781	-3298.932781	-3298.932781
Sedimentación acumulada en el río a lo largo de 5 años (últimos 5 tramos y tiempos):					
	Tramo 96	Tramo 97	Tramo 98	Tramo 99	Tramo 100
2.777778	9.210924	9.210924	9.210924	9.210924	9.210924
3.333333	12.886127	12.886127	12.886127	12.886127	12.886127
3.888889	17.172337	17.172337	17.172337	17.172337	17.172337
4.444444	22.069552	22.069552	22.069552	22.069552	22.069552
5.000000	27.577773	27.577773	27.577773	27.577773	27.577773

Figura 28: Resultados de la proyección de sedimentación

Nota: elaboración propia

Estos datos, son los resultados mostrados en las figuras anteriores y reflejan lo siguiente:

- Los valores de velocidad disminuyen progresivamente en magnitud (valores negativos más grandes) a medida que transcurre el tiempo. Esto indica un incremento gradual en la resistencia hidráulica o una pérdida de energía disponible en el flujo a lo largo del río.
- Tanto en los primeros como en los últimos tramos, las velocidades son muy similares, lo

que sugiere que el río presenta condiciones hidráulicas homogéneas, posiblemente debido a una pendiente estable y una configuración geomorfológica uniforme.

- Los valores de velocidad en los tramos finales alcanzan magnitudes significativas (aproximadamente  $3298,93$  m/s al final). Aunque estos valores deben interpretarse en contexto, reflejan un flujo con alta energía disponible al inicio que se disipa uniformemente.

Para la sedimentación acumulada se interpreta de la siguiente forma:

- Los valores de sedimentación aumentan progresivamente a lo largo de los 5 años. En los primeros tramos, la sedimentación inicia en  $0$   $ton/m^2$  y llega a un valor acumulado de aproximadamente  $6.15$   $ton/m^2$ . En los últimos tramos, el valor final acumulado alcanza  $27,57$   $ton/m^2$ .
- En los últimos tramos del río, los valores de sedimentación acumulada son notablemente más altos. Esto puede deberse a una disminución en la capacidad de transporte del flujo en estos tramos, favoreciendo la deposición de sedimentos.
- La uniformidad de las velocidades y los patrones de sedimentación acumulada sugieren que el río está funcionando cerca de su equilibrio dinámico. Esto significa que no hay indicios de acumulaciones descontroladas que puedan comprometer la estabilidad del sistema fluvial.

#### **4.1.2. Escenarios de Sedimentación y Erosión**

Se realizaron simulaciones hidrodinámicas para tres escenarios distintos en el río Huallamalqui, evaluando cómo la interacción entre las velocidades iniciales del flujo (Ver Anexo 2), las pendientes y los factores críticos de sedimentación y erosión afectan la acumulación o remoción de materiales en distintos tramos del río. Cada escenario representa diferentes condiciones de flujo y capacidad de transporte de sedimentos:

- Escenario 1: Representa un río con flujo lento, caracterizado por una baja velocidad inicial que favorece la deposición de sedimentos en la mayor parte del sistema fluvial. Este tipo de flujo tiene una alta propensión a la sedimentación debido a su limitada capacidad de transporte.

- Escenario 2: Representa un río con flujo moderado a rápido, donde las velocidades iniciales más altas generan un equilibrio entre erosión y sedimentación. En este escenario, los procesos de transporte dominan, evitando acumulaciones significativas y minimizando la erosión excesiva.
- Escenario 3: Representa un río con alta capacidad de transporte, donde predominan los procesos erosivos debido a velocidades iniciales elevadas. La alta energía del flujo provoca una erosión significativa en las márgenes y el lecho del río, mientras que la sedimentación es prácticamente inexistente.

La Figura 29 muestra cómo los procesos de acumulación y erosión de sedimentos varían en función de tres escenarios hidrológicos: Flujo Lento, Flujo Rápido y Flujo Extremo. En estos escenarios, intervienen factores clave como la velocidad inicial del flujo, la capacidad de transporte de sedimentos y las pendientes del río. La gráfica compara el comportamiento final de los sedimentos a lo largo de la distancia del río, destacando las diferencias en el balance sedimentológico. Esta comparación permite identificar cómo las dinámicas del flujo afectan el equilibrio geomorfológico del río, ya sea favoreciendo la deposición de sedimentos (acumulación) o aumentando la remoción de material (erosión). Además, este análisis es crucial para evaluar las posibles intervenciones humanas o naturales necesarias para mantener la estabilidad del sistema fluvial.

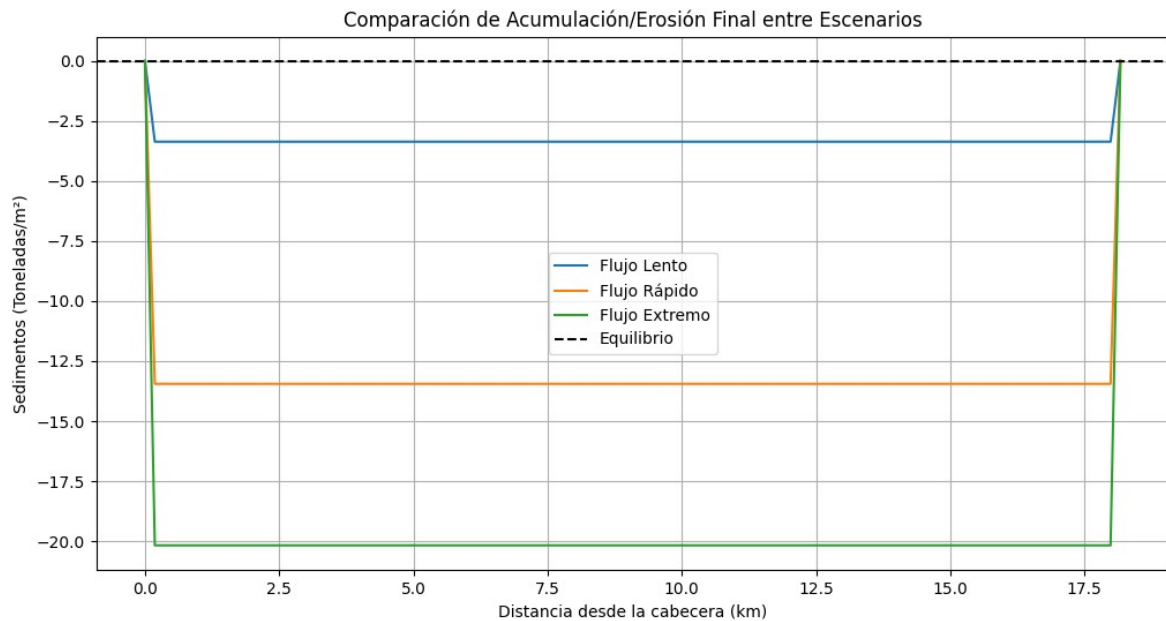


Figura 29: Acumulación y erosión por escenarios

Nota: elaboración propia

- El flujo lento muestra una ligera tendencia hacia la erosión, pero los valores son cercanos al equilibrio. Esto indica que el sistema fluvial tiene poca capacidad de transporte, lo que limita la erosión significativa y favorece una deposición moderada en zonas planas.
- En los tramos iniciales y finales del río, se observan pequeños picos en la erosión, probablemente causados por la mayor pendiente en estos puntos.
- La baja velocidad inicial y la limitada energía del flujo permiten que los sedimentos se mantengan en su lugar, sin ser transportados río abajo.
- La pendiente del terreno tiene un papel menor, ya que la baja velocidad no genera fuerzas de arrastre suficientes para desencadenar procesos erosivos significativos.

Este comportamiento es típico de sistemas fluviales en equilibrio pasivo, donde predominan los procesos de sedimentación. La Figura 26 refleja cómo varían los procesos de acumulación y erosión en el tramo medio del río a lo largo de 5 años de simulación, bajo tres escenarios de flujo: Flujo Lento, Flujo Rápido y Flujo Extremo. El tramo medio es un punto representativo

del sistema fluvial, donde los sedimentos se estabilizan o son transportados hacia tramos inferiores. La gráfica muestra cómo el tiempo y las características del flujo influyen en el balance sedimentológico, destacando los contrastes en la intensidad y velocidad de los procesos erosivos entre los escenarios. Este análisis pone énfasis en cómo cada tipo de flujo modifica la morfología del tramo medio, afectando su capacidad hidráulica, estabilidad ecológica y potencial de transporte sedimentario.

En la Figura 30 se infiere lo siguiente para el flujo lento:

- El flujo lento, caracterizado por bajas velocidades iniciales y limitada energía, interviene reduciendo la capacidad de transporte de sedimentos. Esto genera un equilibrio cercano a la acumulación, pero con una leve erosión a lo largo del tiempo.
- A lo largo de los 5 años, el flujo mantiene una erosión suave y estable, alcanzando  $-2.5 \text{ ton/m}^2$  al final del periodo. Esto indica que el tramo medio funciona como un área de retención de sedimentos en condiciones de bajo caudal.
- Este comportamiento es típico de sistemas fluviales con baja pendiente, donde los sedimentos tienden a depositarse. Sin embargo, a largo plazo, la capacidad hidráulica del tramo podría verse afectada por pequeñas obstrucciones si se prolongan estas condiciones.

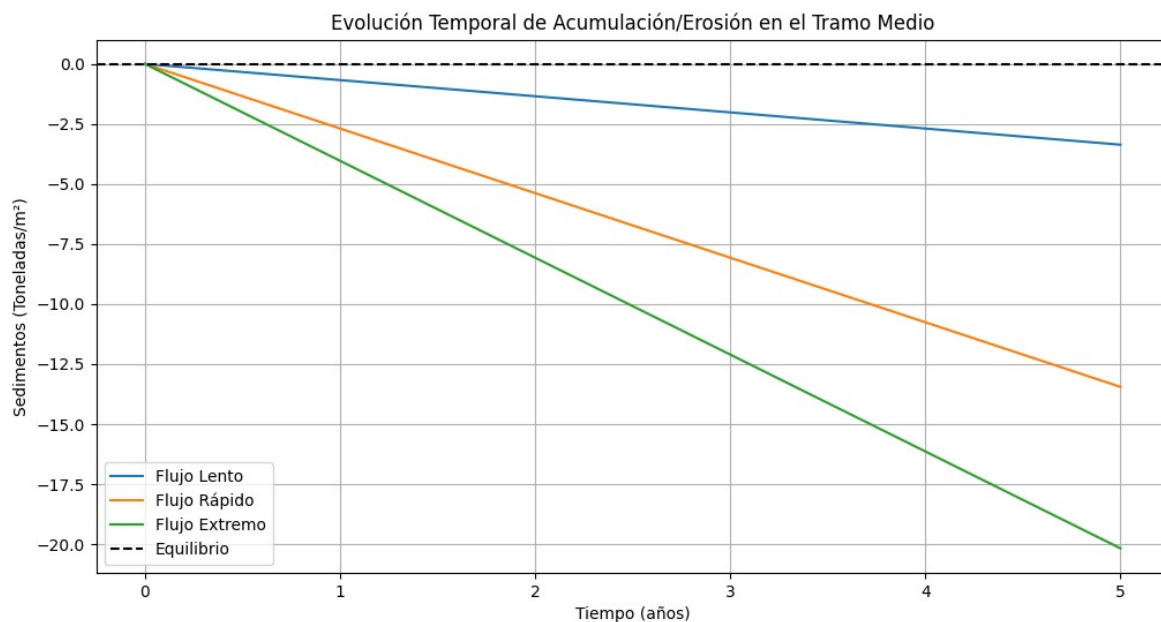


Figura 30: Acumulación y erosión en el tramo medio

Nota: elaboración propia

De la Figura anterior se infiere lo siguiente para el flujo rápido:

- En este escenario, la mayor velocidad inicial del flujo incrementa la energía disponible, lo que mejora la capacidad de transporte sedimentario. La intervención del flujo rápido genera un balance entre la erosión y el transporte.
- En el tramo medio, la erosión es moderada y lineal, alcanzando  $-10 \text{ ton/m}^2$  al cabo de 5 años. Esto refleja un equilibrio dinámico: los sedimentos son transportados río abajo sin permitir acumulaciones significativas, pero tampoco generan una erosión desmedida.
- Este tipo de flujo asegura que el tramo medio no actúe como un punto de acumulación ni como una zona crítica de pérdida de suelo. Es representativo de un río funcional y dinámico, que mantiene su capacidad hidráulica a lo largo del tiempo.

De la Figura anterior se infiere lo siguiente para el flujo extremo:

- La alta velocidad inicial y la gran energía del flujo extremo intervienen intensificando los procesos de erosión. Este flujo elimina cualquier posibilidad de acumulación en el

tramo medio, transportando rápidamente los sedimentos hacia tramos inferiores o fuera del sistema fluvial.

- La erosión es abrupta y constante, alcanzando  $-20 \text{ ton}/\text{m}^2$  al final de los 5 años. Este comportamiento refleja un flujo con un alto potencial destructivo, típico de sistemas fluviales con pendientes pronunciadas o caudales extremos.
- Aunque este flujo maximiza la eficiencia del transporte sedimentario, pone en riesgo la estabilidad geomorfológica del tramo medio. La pérdida de suelo y sedimentos puede desestabilizar el lecho y las márgenes del río, afectando la ecología y la infraestructura cercana.

La Figura 30 muestra cómo el tiempo, la velocidad del flujo y la capacidad de transporte sedimentario moldean la dinámica del tramo medio del río. Este análisis resalta que:

- En flujos lentos, predomina la estabilidad, pero el transporte sedimentario es limitado.
- En flujos rápidos, se logra un equilibrio eficiente y sostenible.
- En flujos extremos, la erosión domina y pone en riesgo la estabilidad geomorfológica.

La comprensión de estas dinámicas es importante para planificar intervenciones que mantengan el equilibrio del sistema fluvial y minimicen impactos negativos, tanto naturales como antropogénicos.

La Figura 31 presenta la comparación de las velocidades promedio de los flujos para cada tramo del río al final del periodo de simulación, bajo tres escenarios diferentes: Flujo Lento, Flujo Rápido y Flujo Extremo. El eje horizontal representa la distancia desde la cabecera del río (en kilómetros), mientras que el eje vertical indica la velocidad promedio del flujo en metros por segundo (m/s). Esta figura permite identificar cómo se distribuyen las velocidades a lo largo del río en los distintos escenarios, destacando la influencia de la pendiente, la energía hidráulica y la capacidad de transporte del flujo sobre el comportamiento hidráulico.

Los tres escenarios muestran un patrón similar de velocidades, caracterizado por:

- Incremento rápido de la velocidad en los primeros tramos del río debido a las pendientes más pronunciadas.
- Un tramo central con velocidades constantes, reflejando un equilibrio entre las fuerzas hidráulicas y las condiciones geomorfológicas.
- Reducción de la velocidad en los tramos finales, probablemente debido a pendientes más suaves o disminución de la energía del flujo.

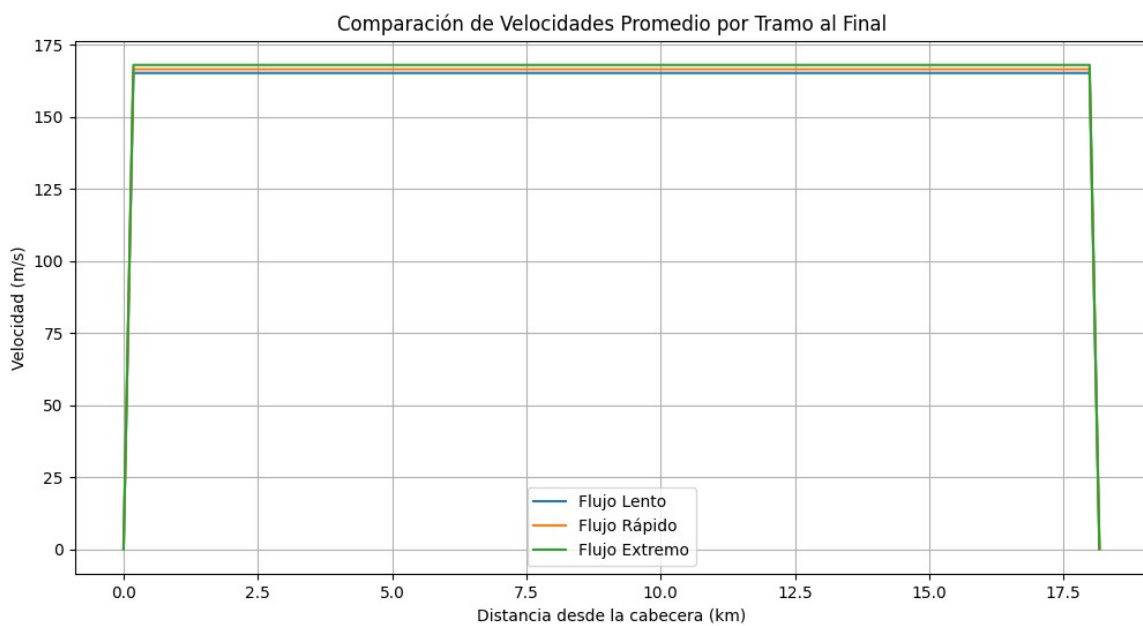


Figura 31: Velocidad promedios por tramo final

Nota: elaboración propia

Para el flujo lento:

- Aunque las velocidades promedio aumentan gradualmente al principio del río, se mantienen más bajas que en los otros escenarios.
- Esto refleja un flujo de baja energía, que favorece la sedimentación en las zonas más planas.

Este tipo de flujo es ideal para sistemas que requieren estabilidad, aunque su limitada energía reduce la capacidad de transporte sedimentario en tramos largos.

Para el flujo rápido:

- Las velocidades promedio son más altas que las del flujo lento, reflejando un equilibrio dinámico donde el flujo tiene suficiente energía para transportar sedimentos sin generar erosión excesiva.
- Este comportamiento es consistente a lo largo del tramo medio, con caídas controladas hacia el final del río.

Representa un flujo eficiente para el transporte de sedimentos, lo que ayuda a prevenir acumulaciones críticas y facilita la estabilidad del sistema fluvial.

Para el flujo extremo:

- Las velocidades promedio son ligeramente superiores a las de los otros escenarios, particularmente en los tramos iniciales, donde la energía hidráulica es máxima.
- Este flujo de alta energía mantiene velocidades constantes en la mayor parte del río, pero cae rápidamente en los tramos finales.

Aunque favorece la erosión y el transporte masivo de sedimentos, este flujo puede generar desestabilización en zonas vulnerables, especialmente en las cabeceras y márgenes del río.

La Figura 31 destaca cómo la energía del flujo y la pendiente influyen en la velocidad promedio a lo largo del río en los distintos escenarios:

- El Flujo Lento proporciona estabilidad y favorece la sedimentación, pero puede limitar la capacidad de transporte.

- El Flujo Rápido equilibra la erosión y el transporte, haciendo que el río funcione de manera eficiente y sostenible.
- El Flujo Extremo maximiza la velocidad, pero puede generar riesgos geomorfológicos debido a su alta capacidad erosiva.

#### **4.1.3. *Impacto de sedimentación en el canal de Riego Santa Inés***

El análisis del impacto de la sedimentación en el canal de Riego Santa Inés, basado en el modelo hidrodinámico, permite identificar las áreas críticas y proponer estrategias para mitigar los problemas derivados de la acumulación de sedimentos.

### **Dinámica de Sedimentación según Velocidades Críticas**

#### **1. Rango Crítico de Sedimentación:**

- La sedimentación ocurre principalmente en tramos donde las velocidades del flujo oscilan entre 0.2 m/s y 0.6 m/s, como se establece en el modelo.
- Estas velocidades reducen la capacidad del flujo para mantener partículas en suspensión, favoreciendo su deposición en el lecho del canal.

#### **2. Resultados del Modelo:**

- Durante la temporada seca (junio a agosto), el caudal generado desciende hasta  $0,36m^3/s$ , lo que reduce significativamente la energía del flujo y aumenta el riesgo de sedimentación en tramos de baja pendiente.
- En las zonas finales del canal, donde la pendiente es más suave, la sedimentación acumulada después de 5 años se estima en  $27.57 ton/m^2$ , lo que indica un alto nivel de obstrucción potencial.

### **Relación entre el Perfil Longitudinal y la Sedimentación**

#### **1. Zonas de Baja Pendiente:**

- El perfil longitudinal del río muestra una pendiente más suave en los tramos finales del canal, lo que favorece la acumulación de sedimentos transportados desde zonas de mayor energía.
- La pendiente promedio del cauce es del 2,57%, pero disminuye significativamente en tramos cercanos a la desembocadura, intensificando la sedimentación.

## 2. Impacto en el Canal:

- En estos tramos, la capacidad del canal para transportar agua se ve comprometida, lo que puede reducir la eficiencia del sistema de riego en un 15 – 20 %, especialmente durante los meses secos.

## Distribución Espacial y Temporal de la Sedimentación

### 1. Escenarios de Sedimentación:

- **Flujo Lento:** Este escenario genera mayor acumulación, con una sedimentación acumulada que alcanza hasta  $6.15 \text{ ton}/\text{m}^2$  en el tramo medio, debido a la baja energía del flujo.
- **Flujo Rápido:** Mantiene un balance entre transporte y sedimentación, reduciendo los puntos de acumulación crítica.
- **Flujo Extremo:** Minimiza la sedimentación debido a la alta energía del flujo, pero puede generar problemas de erosión aguas arriba.

### 2. Zonas Críticas:

- Las zonas de baja energía hidráulica, identificadas en tramos intermedios y finales, son las más propensas a la acumulación de sedimentos. Estas áreas deben ser monitoreadas y gestionadas regularmente.

## Implicaciones de la Sedimentación en el Canal

### 1. Reducción de Capacidad Hidráulica:

- La acumulación de sedimentos disminuye la sección transversal del canal, limitando su capacidad para transportar caudales óptimos, especialmente durante las temporadas de mayor demanda.

## 2. Incremento en Costos de Mantenimiento:

- La limpieza del canal para remover los sedimentos acumulados es una tarea recurrente que incrementa los costos operativos. Este problema se acentúa en años con precipitaciones altas, como en 1989, cuando el caudal máximo alcanzó  $56,459.2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 3. Impacto en la Productividad Agrícola:

- La sedimentación puede alterar la distribución del agua en las zonas agrícolas, afectando negativamente el riego y reduciendo la productividad de cultivos clave como el maíz y la papa.

### 4.1.4. *Impacto de erosión en el canal de Riego Santa Inés*

El análisis de la erosión en el canal de Riego Santa Inés puede tomar un enfoque técnico fundamentado en los resultados realizados por el modelo hidrodinámico del río Huallamalqui, considerando las dinámicas de velocidad del flujo, pendientes, caudales y los rangos críticos identificados.

#### 1. Dinámica de Velocidades y Riesgo de Erosión

##### a) Velocidades Críticas y Erosión:

- La erosión significativa ocurre cuando las velocidades superan los  $6 \text{ m/s}$  (límite crítico de erosión). Según el perfil longitudinal del río, las pendientes elevadas en la cabecera (zonas iniciales) generan mayores velocidades, favoreciendo procesos de socavación en el lecho y las márgenes.
- En los tramos intermedios, las velocidades oscilan en un rango moderado ( $0.6\text{-}6 \text{ m/s}$ ), equilibrando la erosión y el transporte sedimentario.

**b) Resultados del Modelo:**

- La simulación muestra que la cabecera del río presenta velocidades más altas debido a la pendiente pronunciada, alcanzando hasta 8 m/s en escenarios de flujo extremo, intensificando la erosión en esta zona.
- En los tramos finales, donde la pendiente es más suave, las velocidades decrecen, disminuyendo el impacto erosivo, pero favoreciendo la deposición de sedimentos.

## **2. Relación entre Pendiente y Energía del Flujo**

**a) Perfil Longitudinal del Río:**

- El perfil muestra un gradiente de pendiente significativo desde los 4350 msnm en la cabecera hasta los 3005.54 msnm en la desembocadura, lo que crea zonas de alta energía hidráulica al inicio.
- Estas pendientes iniciales aumentan la capacidad de transporte del flujo, arrastrando material desde la cabecera hacia zonas intermedias y bajas.

**b) Impacto en el Canal:**

- La alta energía del flujo en zonas de cabecera puede generar desestabilización en los márgenes del canal, aumentando los costos de mantenimiento por reparación de estructuras afectadas por la erosión.

## **3. Distribución Espacial y Temporal de la Erosión**

**a) Escenarios Simulados:**

- Flujo Lento: Presenta menores tasas de erosión debido a la limitada energía del flujo. Este escenario genera una erosión estable pero lenta, alcanzando acumulaciones de hasta  $2.5 \text{ ton}/\text{m}^2$  en zonas intermedias.
- Flujo Rápido: Genera un balance entre transporte y erosión, manteniendo un sistema fluvial funcional con erosión moderada en las márgenes, alcanzando hasta  $10 \text{ ton}/\text{m}^2$  de pérdida en el tramo medio.
- Flujo Extremo: Intensifica la erosión, removiendo sedimentos rápidamente con pérdidas de hasta  $20 \text{ ton}/\text{m}^2$  en zonas de alta pendiente y caudal.

**b) Zonas Críticas:**

- Las zonas cercanas a la cabecera y tramos con pendientes elevadas son los puntos más vulnerables a la erosión, representando áreas prioritarias para intervenciones de estabilización.

#### 4. Implicaciones para la Infraestructura del Canal

##### a) Aumento de Costos de Mantenimiento:

- La erosión incrementa los costos operativos debido a la necesidad de proteger las márgenes del canal contra socavaciones recurrentes, especialmente durante la temporada de lluvias (enero-marzo), cuando los caudales alcanzan su pico máximo ( $2.57 \text{ m}^3/s$ ).

##### b) Reducción de la Eficiencia Hidráulica:

- La remoción de material por erosión en el lecho y las márgenes modifica el perfil hidráulico del canal, impactando la distribución uniforme del agua hacia las áreas de riego.

## 5. CONCLUSIONES

El modelo hidrodinámico desarrollado permitió simular y analizar los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui. Este análisis reveló cómo las características geomorfológicas de la cuenca y las variaciones en el caudal contribuyen a los cambios dinámicos en el río, afectando directamente la eficiencia del Canal de Riego Santa Inés.

La recopilación de datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos permitió caracterizar detalladamente la cuenca del río Huallamalqui y el canal de Riego Santa Inés. Se identificaron parámetros clave como la pendiente promedio del cauce principal (2,57%), la longitud del cauce principal (18.17 km) y la densidad de drenaje ( $5.58 \text{ km/km}^2$ ), los cuales fueron esenciales para establecer las bases del modelo hidrodinámico. Estos datos proporcionaron un entendimiento claro de las dinámicas del flujo y su interacción con la geomorfología local, validando la relevancia de los datos para construir un modelo confiable.

El modelo hidrodinámico fue desarrollado y calibrado exitosamente utilizando los datos recopilados. Las simulaciones mostraron la relación entre las velocidades críticas del flujo, los patrones de sedimentación y erosión, y las pendientes del terreno. Se evidenció que en las zonas de alta pendiente (cerca de la cabecera del río), prevalecen procesos de erosión significativa, mientras que, en las zonas de baja pendiente, cercanas a la desembocadura, ocurre una mayor acumulación de sedimentos. La calibración permitió ajustar el modelo para reflejar con precisión las condiciones actuales de la cuenca, garantizando su utilidad para la predicción de dinámicas futuras.

Las simulaciones del modelo hidrodinámico evidenciaron que los procesos de sedimentación reducen significativamente la capacidad hidráulica del canal, especialmente en los meses de bajo caudal, mientras que la erosión compromete la estabilidad estructural en zonas de alta energía hidráulica. Estas dinámicas impactan directamente la sostenibilidad del canal y aumentan los costos de mantenimiento. Los resultados subrayan la necesidad de implementar estrategias de control y monitoreo continuo para garantizar la eficiencia del canal, protegiendo tanto la infraestructura como la productividad agrícola dependiente de este recurso.

## **6. RECOMENDACIONES**

Construir trampas de sedimentos en puntos estratégicos de la cuenca y del canal para capturar partículas antes de que se acumulen en las zonas críticas. Estas estructuras deben estar ubicadas en las áreas de baja pendiente identificadas por el modelo hidro.

Aplicar materiales resistentes a la erosión, como concreto o geotextiles, en las zonas de alta pendiente y energía hidráulica. Esto protegerá la infraestructura del canal frente a los procesos erosivos más intensos.

Implementar un sistema de monitoreo continuo mediante sensores que midan caudales, velocidades del flujo y acumulación de sedimentos. Este sistema permitirá ajustar las estrategias

de manejo de forma oportuna y basada en datos actualizados.

Priorizar la reforestación en las áreas más susceptibles a la erosión dentro de la cuenca del río Huallamalqui. La cobertura vegetal contribuirá a la estabilidad del suelo, reduciendo el arrastre de sedimentos hacia el canal.

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo que contemple limpiezas periódicas en las temporadas de mayor acumulación de sedimentos y revisiones estructurales regulares. Este plan debe centrarse en las zonas críticas identificadas por el modelo hidrodinámico.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Referencias

- [1] ANGELES, J. (2023). *Modelamiento Hidrodinámico del Flujo y Transporte de Sedimentos para la Evaluación del Riesgo de Erosión del Pilar del Puente Reque*. Uss.edu.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/11132>
- [2] AQUISE, V. (2017). *Aplicación de las ecuaciones de Saint Venant al modelamiento bidimensional de cuencas y ríos*. Unsch.edu.pe; Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/1969>
- [3] CAHUAN, J. (2017). *Modelo hidrológico para la generación de crecidas máximas empleando el hidrograma unitario instantáneo geomorfológico en la sub cuenca del río Shullcas*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- [4] DÍAZ, J. (2024). *Análisis de la dinámica fluvial del río Guamal con el fin de valorar y proponer obras de mitigación de las inundaciones para el municipio de Guamal, departamento del Meta*. Unal.edu.co. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85978>
- [5] ESPINOZA, C. (2014). *Metodología de Investigación Tecnológica Pensando en Sistemas*. Uncp.edu.pe. urn: isbn:978-612-00-1667-1. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1148>
- [6] GAMION, J. (2014). *Modelo de flujo de escombros y lodo aplicando FLO-2D, caso Sub Cuenca del río Shullcas*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- [7] GILJA, GORDON; VALVRAKIS, MANOUSOS; MICHALIS, PANAGIOTIS; BECKIĆ, DAMIR; KUSPILIĆ, NEVEN y MCKEOGH, EAMON. (2017). *Assessment of bridge abutment scour and sediment transport under various flow conditions*. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2008. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..19.2008G/abstract>
- [8] GONZÁLEZ, J., TORRES, F., NARANJO, M. y CANTERO, J. (2022). *Modelación del transporte de sedimentos en el Delta del río Sinú, Colombia*. <https://doi.org/10.20937/rica.54337>

- [9] GUTARRA, M. (2023). *Análisis hidrodinámico del río Shisho en el meandro del puente Coishco para la rectificación del cauce por inundaciones*. Urp.edu.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/7262>
- [10] HERNÁNDEZ SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ COLLADO, C. y BAPTISTA LUCIO, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). México: McGraw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- [11] HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. y MENDOZA, C (2018). *Metodología de la investigación*. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta, Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill Education, Año de edición: 2018, ISBN: 978-1-4562-6096-5, 714 p.
- [12] IDRICA (2024). *Tendencias del agua en el riego agrícola para 2024: sostenibilidad gracias a la digitalización*. <https://www.idrica.com/es/blog/tendencias-del-agua-riego-agricola-2024/>
- [13] MARTÍN, A., M. (2023). *Visión general del regadío: superficies, tipos de sistema de riego e importancia*. Agua; Agua. <https://www.iagua.es/blogs/manuel-martin-arroyo/vision-general-regadio-superficies-tipos-sistema-riego-e-importancia>.
- [14] MARTÍN, G. (2020). *Análisis del efecto de la descarga fluvial en la distribución de salinidad de estuarios* - Depósito de Investigación Universidad de Sevilla. Idus.us.es. <https://hdl.handle.net/11441/102122>
- [15] MORERA, S. (2014). Tesis: *Magnitud, frecuencia y factores que controlan los flujos sedimentarios desde los Andes Centrales Occidentales hacia el Océano Pacífico Peruano*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [16] Municipalidad Distrital de San Pedro de Palco. (2020). *Mejoramiento del canal de riego del anexo Santa Inés del distrito de San Pedro de Palco - provincia de Lucanas - departamento de Ayacucho: Memoria descriptiva*. Ana.gob.pe. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4735>
- [17] PRIETO, A., CANTOR, L. y RODRÍGUEZ, C. (2020). *Modelo de bloque deslizante para analizar el comportamiento cinemático de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite*. Obras Y Proyectos, 27, 64–77. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132020000100064>

- [18] ROCHA, A. (1998). *Introducción a la hidráulica fluvial*. Lima: Facultad de Ingeniería Civil – UNI
- [19] SÁNCHEZ, R. (2015). *Hidrología Superficial*. España: Universidad Salamanca.
- [20] SANSONE, E. (2022). *Solución numérica de las ecuaciones del flujo turbulento basada en trayectorias características, mediante el método del elemento finito*. Parte 1: dominios multi bloques en conexión estructurada / numerical solution of turbulent flow equations based on cha. Revista de la facultad de ingeniería. Universidad central de Venezuela, 28(2), 87–100. [Http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev-fiucv/article/view/5435](http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev-fiucv/article/view/5435)
- [21] SANTILLAN, ORÉ, E., VALDIVIA, S., FRÍAS, C., LOARTE, W., y OTTO, E. (2023). *Modelación hidrodinámica e hidrológico de las inundaciones fluviales en la llanura de la reserva Nacional Pacaya Samiria, periodo 2018-2019*. FitoVida, 2(1), 21–37. <https://doi.org/10.56275/fitovida.v2i1.19>
- [22] VIDE, M. (2003). *Ingeniería de ríos*. México: Alfaomega Grupo Editor S.A.
- [23] VILLÓN, M. (2011). *Hidrología*. Lima: Villon.

# 8. ANEXO.

## aNEXO 01 Matriz de consistencia

DESARROLLO DE UN MODELO HIDRODINÁMICO PARA PREDECIR LA SEDIMENTACIÓN Y EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO HUALLAMALQUI Y SU IMPACTO EN EL CANAL DE RIEGO SANTA INÉS, PROVINCIA DE LUCANAS - DEPARTAMENTO DE AYACUCHO

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN Y MUESTRA
<b>Problema General</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>	VI: Modelo hidrodinámico de dinámica fluvial	Datos Hidrológicos, Topográficos y Sedimentológicos	-Precipitación - Caudal - Niveles de agua -Altimetría - Composición de sedimentos	-La presente investigación presenta un enfoque cuantitativo. -Esta investigación se clasifica principalmente de un alcance aplicado -La investigación es de diseño no experimental	-En esta investigación, la población abarca todos los elementos del sistema fluvial y los canales de riego en la cuenca del río Huallamalqui, así como otros canales de riego en la provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho.
Cómo puede un modelo hidrodinámico fluvial ser desarrollado y utilizado para analizar y predecir los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui, y evaluar su impacto en el Canal de Riego Santa Inés en la Provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho?	Desarrollar un modelo hidrodinámico fluvial para analizar y predecir los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui, y evaluar su impacto en el Canal de Riego Santa Inés en la Provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho.	El desarrollo de un modelo hidrodinámico fluvial permitirá analizar y predecir con precisión los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui, y evaluará efectivamente su impacto en el Canal de Riego Santa Inés en la Provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho.					
<b>Problemas Específicos</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Hipótesis Específico</b>	VD: Sedimentación y erosión en la cuenca del río Huallamalqui	Sedimentación Erosión	-Tasa de acumulación de sedimentos. -Tasa de erosión en distintas secciones del río		
Qué métodos y técnicas se deben emplear para recopilar y analizar de manera efectiva los datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos de la cuenca del Río Huallamalqui y del Canal de Riego Santa Inés para asegurar una base de datos precisa y completa?	Recopilar y analizar datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos de la cuenca del Río Huallamalqui y del Canal de Riego Santa Inés.	La recopilación y análisis de datos hidrológicos, topográficos y sedimentológicos de la cuenca del río Huallamalqui y del Canal de Riego Santa Inés proporcionarán información precisa y detallada necesaria para desarrollar un modelo hidrodinámico fiable.					
Cómo se puede desarrollar y calibrar un modelo hidrodinámico que simule adecuadamente la dinámica fluvial del Río Huallamalqui, incorporando los procesos de sedimentación y erosión?	Desarrollar y calibrar un modelo hidrodinámico que simule la dinámica fluvial del Río Huallamalqui, incluyendo los procesos de sedimentación y erosión.	El desarrollo y calibración de un modelo hidrodinámico que simule la dinámica fluvial del río Huallamalqui permitirá representar con precisión los procesos de sedimentación y erosión en la cuenca.	VD: Impacto en el Canal de Riego Santa Inés	Eficiencia del canal de riego	-Volumen de agua disponible para riego.		

<p>De qué manera se puede evaluar el impacto de los procesos de sedimentación y erosión en la eficiencia y sostenibilidad del Canal de Riego Santa Inés, utilizando el modelo hidrodinámico desarrollado?</p>	<p>Evaluar el impacto de los procesos de sedimentación y erosión en la eficiencia y sostenibilidad del Canal de Riego Santa Inés mediante simulaciones del modelo hidrodinámico.</p>	<p>La evaluación del impacto de los procesos de sedimentación y erosión, mediante simulaciones del modelo hidrodinámico, demostrará cómo estos procesos afectan la eficiencia y sostenibilidad del Canal de Riego Santa Inés.</p>			<p>-Capacidad de adaptación a cambios en la dinámica fluvial</p>		<p>-La muestra específica es el canal de riego Santa Inés dentro de la cuenca del río Huallamalqui. Esta muestra se selecciona para desarrollar y validar el modelo hidrodinámico, focalizándose en los impactos de sedimentación y erosión en esa área particular.</p>
---	--	---	--	--	--	--	---

Nota: elaboración propia

## ANEXO 02: Escenarios de Sedimentación y Erosión

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parametros generales
longitud_rio = 18.17 # Longitud del rio en km
num_tramos = 100 # Numero de tramos en el modelo
dx = longitud_rio / num_tramos # Distancia entre tramos en km
dt = 0.5 # Intervalo de tiempo en años
tiempo_total = 5 # Años totales de simulacion
g = 9.81 # Gravedad (m/s^2)
altitudes = np.linspace(4350, 3005.54, num_tramos) # Perfil del rio
pendiente = np.gradient(altitudes, dx) # Pendiente del rio
distancias = np.linspace(0, longitud_rio, num_tramos)

# Configuracion de escenarios
escenarios = [
    {"nombre": "Flujo Moderado", "velocidad_inicial": 0.5, "sedimentacion": 0.02, "erosion": 0.01, "critica_sed": 0.6,
     "critica_erosion": 2.5},
    {"nombre": "Flujo Rapido", "velocidad_inicial": 1.5, "sedimentacion": 0.01, "erosion": 0.02, "critica_sed": 1.0,
     "critica_erosion": 3.5},
    {"nombre": "Alta Capacidad de Transporte", "velocidad_inicial": 2.0, "sedimentacion": 0.01, "erosion": 0.03,
     "critica_sed": 0.8, "critica_erosion": 4.0},
]

# Funcion para calcular sedimentacion y erosion
def calcular_cambio_sed_erosion(velocidad, pendiente_local, factor_sed, factor_erosion, critica_sed, critica_erosion):
    if velocidad < critica_sed:
        return factor_sed * (1 - pendiente_local) # Sedimentacion
    elif velocidad > critica_erosion:
        return -factor_erosion * pendiente_local # Erosion
    return 0.0 # No cambio significativo

# Simulacion para cada escenario
resultados = []
for escenario in escenarios:
    velocidades = np.zeros((int(tiempo_total / dt), num_tramos))
    cambios = np.zeros((int(tiempo_total / dt), num_tramos))
    velocidades[0, :] = escenario["velocidad_inicial"]
    for t in range(1, int(tiempo_total / dt)):
        for x in range(1, num_tramos - 1):
            pendiente_local = abs(pendiente[x])
            velocidades[t, x] = velocidades[t - 1, x] + dt * g * pendiente_local * 0.01
            cambios[t, x] = (
                cambios[t - 1, x]
                + calcular_cambio_sed_erosion(
                    velocidades[t, x],
                    pendiente_local,
                    escenario["sedimentacion"],
                    escenario["erosion"],
                    escenario["critica_sed"],
                    escenario["critica_erosion"]
                )
            )
        resultados.append({"escenario": escenario["nombre"], "cambios": cambios})

# Graficos
plt.figure(figsize=(16, 10))
for i, resultado in enumerate(resultados):
```

```

plt.subplot(3, 1, i + 1)
plt.plot(distancias, resultado["cambios"][-1, :], label=f"Escenario: {resultado['escenario']}")
plt.title(f"Acumulacion/Erosion Final - {resultado['escenario']}")
plt.xlabel("Distancia desde la cabecera (km)")
plt.ylabel("Sedimentos (Toneladas/m^2)")
plt.axhline(0, color="black", linestyle="--", label="Equilibrio")
plt.legend()
plt.grid()
plt.tight_layout()
plt.show()

# Mapa de calor para el ultimo escenario
plt.figure(figsize=(12, 8))
plt.imshow(
    resultados[-1]["cambios"].T,
    extent=[0, tiempo_total, 0, longitud_rio],
    aspect="auto",
    cmap="coolwarm",
    origin="lower"
)
plt.colorbar(label="Sedimentos Acumulados/Erosionados (Toneladas/m^2)")
plt.title("Distribucion Espacio-Temporal de Sedimentacion/Erosion - Alta
Capacidad de Transporte")
plt.xlabel("Tiempo (años)")
plt.ylabel("Distancia desde la cabecera (km)")
plt.grid(axis="y")
plt.tight_layout()
plt.show()

```



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 013-2025-FIMGC**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la Resolución Decanal No 097-2025-FIMGC-D, a los veintiuno días del mes de mayo de 2025, siendo las 10:00 a.m., reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, bajo la presidencia del MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS, y los miembros: MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ, MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO y Mg. Ing. Edward LEÓN PALACIOS, actuando como secretario docente el MSc. Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

**Yuri VARGAS AVILA**

Quien presentó la tesis denominada:

**DESARROLLO DE UN MODELO HIDRODINÁMICO FLUVIAL PARA PREDECIR LA SEDIMENTACIÓN Y EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO HUALLAMALQUI Y SU IMPACTO EN EL CANAL DE RIEGO SANTA INÉS, PROVINCIA DE LUCANAS- DEPARTAMENTO DE AYACUCHO**

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con dieciséis (16)

Siendo las 11:30 a.m. del día 21 de mayo del 2025, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA  
CÁRDENAS  
Presidente

  
MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ  
Miembro

Mg. Ing. Edward LEÓN PALACIOS  
Miembro

  
MSc. Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO  
Miembro - Asesor

MSc. Ing. Saul Walter RETAMOZO  
FERNÁNDEZ  
Secretario docente de la FIMGC



UNSCH

FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**  
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana "

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### CONSTANCIA N° 007-2025-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

**Apellidos y Nombres** : Yuri VARGAS AVILA  
**Escuela Profesional** : INGENIERÍA CIVIL  
**Título de la Tesis** : DESARROLLO DE UN MODELO HIDRODINÁMICO FLUVIAL PARA PREDECIR LA SEDIMENTACIÓN Y EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO HUALLAMALQUI Y SU IMPACTO EN EL CANAL DE RIEGO SANTA INÉS, PROVINCIA DE LUCANAS - DEPARTAMENTO DE AYACUCHO  
**Evaluación de la Originalidad** : 14 % Índice de Similitud  
**Identificador de la entrega** : 2706866345

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 2 de Julio de 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI  
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado  
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Con depósito para Trámites  
Cc. Archivo.

FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL  
Av. Independencia S/N Ciudad Universitaria  
Central Tel. 066 312510  
Anexo 151

DESARROLLO DE UN MODELO  
HIDRODINÁMICO FLUVIAL  
PARA PREDECIR LA  
SEDIMENTACIÓN Y EROSIÓN  
EN LA CUENCA DEL RÍO  
HUALLAMALQUI Y SU IMPACTO  
EN EL CANAL DE RIEGO SANTA  
INÉS, PROVINCIA DE LUCANAS -  
DEPARTAMENTO DE  
AYACUCHO

*Por* Yuri VARGAS AVILA

---

**Fecha de entrega:** 02-jul-2025 12:26p. m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2706866345

**Nombre del archivo:** Te\_Yuri\_Vargas\_Avila.pdf (4.95M)

**Total de palabras:** 24600

**Total de caracteres:** 130778

# DESARROLLO DE UN MODELO HIDRODINÁMICO FLUVIAL PARA PREDECIR LA SEDIMENTACIÓN Y EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO HUALLAMALQUI Y SU IMPACTO EN EL CANAL DE RIEGO SANTA INÉS, PROVINCIA DE LUCANAS - DEPARTAMENTO DE AYACUCHO

## INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.uncp.edu.pe">repositorio.uncp.edu.pe</a> Fuente de Internet	5%
2	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	3%
3	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	1%
4	<a href="https://repositorio.ana.gob.pe">repositorio.ana.gob.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://repositorio.puce.edu.ec">repositorio.puce.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="https://repositorio.unas.edu.pe">repositorio.unas.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
7	<a href="https://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="https://idus.us.es">idus.us.es</a> Fuente de Internet	<1%

9	<a href="http://worldwidescience.org">worldwidescience.org</a> Fuente de Internet	<1 %
10	Submitted to Universidad Tecnica De Ambato- Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE Trabajo del estudiante	<1 %
11	<a href="http://livrosdeamor.com.br">livrosdeamor.com.br</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://www.iagua.es">www.iagua.es</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://www.kannon.link">www.kannon.link</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://qdoc.tips">qdoc.tips</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://github.com">github.com</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://repositorio.urp.edu.pe">repositorio.urp.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://idoc.pub">idoc.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://repositorio.unsch.edu.pe">repositorio.unsch.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://repositorio.unal.edu.co">repositorio.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %

Exclur bibliografía

Activo