

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



TESIS

**“GASTO SÓLIDO DE FONDO EN EL CAUCE DE LA QUEBRADA
CALISPUQUIO AGUAS ARRIBA DE LA CANALIZACIÓN DEL JR. NICOLÁS
ARRIOLA, CAJAMARCA, 2024”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO HIDRÁULICO

AUTOR:

JHONATAN ELIAS TERRONES ESTRADA

ASESOR:

Dr. Ing. JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE

CAJAMARCA - PERÚ

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** JHONATAN ELIAS TERRONES ESTRADA
DNI: 73885993
Escuela Profesional: INGENIERÍA HIDRÁULICA
2. **Asesor:** Dr. Ing. JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE.
Facultad: INGENIERÍA.
3. **Grado académico o título profesional**
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. **Tipo de Investigación:**
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. **Título de Trabajo de Investigación:** GASTO SÓLIDO DE FONDO EN EL CAUCE DE LA QUEBRADA CALISPUQUIO AGUAS ARRIBA DE LA CANALIZACIÓN DEL JR. NICOLÁS ARRIOLA, CAJAMARCA, 2024.
6. **Fecha de evaluación:** 19 de Agosto de 2025
7. **Software antiplagio:** ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 18 %
9. **Código Documento:** oid:3117: 484789073
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 20 de Agosto de 2025



FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos: JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE

DNI: 26609077



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258001 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 20/08/2025 22:51:54-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : GASTO SÓLIDO DE FONDO EN EL CAUCE DE LA QUEBRADA CALISPUQUIO AGUAS ARRIBA DE LA CANALIZACIÓN DEL JR. NICOLÁS ARRIOLA, CAJAMARCA, 2024.

ASESOR : Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0532-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 25 de agosto de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **tres días del mes de setiembre de 2025**, siendo las diez horas (10:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Ambiente 1A - Segundo Piso), de la facultad de Ingeniería, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Vocal : Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz.
Secretario : M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **GASTO SÓLIDO DE FONDO EN EL CAUCE DE LA QUEBRADA CALISPUQUIO AGUAS ARRIBA DE LA CANALIZACIÓN DEL JR. NICOLÁS ARRIOLA, CAJAMARCA, 2024**, presentado por el Bachiller en Ingeniería Hidráulica **JHONATAN ELIAS TERRONES ESTRADA**, asesorado por el Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 97 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 18 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 18 PTS.

Dr. Virilo (En letras)

En consecuencia, se lo declara *Aprobado* con el calificativo de *Dr. Virilo* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *12:00* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Luis Andrés León Chávez
Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Presidente

Gaspar Virilo Méndez Cruz
Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz
Vocal

José Hilario Longa Álvarez
M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.
Secretario

José Francisco Huamán Vidaurre
Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Asesor



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería Hidráulica: JHONATAN ELIAS TERRONES ESTRADA.

<i>Bachiller en Ingeniería</i> RUBRO	PUNTAJE
	Máximo/Calificación
2. DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	
2.1. Capacidad de síntesis	03
2.2. Dominio del tema	03
2.3. Consistencia de las alternativas presentadas	03
2.4. Precisión y seguridad en las respuestas	02
PUNTAJE TOTAL (MÁXIMO 12 PUNTOS)	11

Cajamarca, 03 de setiembre de 2025

Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Presidente

Dr. Ing. Gaspar Virilo-Méndez Cruz.
Vocal

M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.
Secretario

Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Asesor



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130

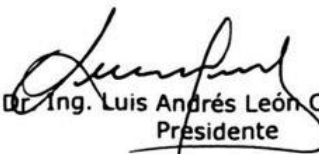


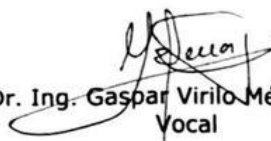
EVALUACIÓN FINAL DE LA SUSTENTACIÓN DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería Hidráulica: JHONATAN ELIAS TERRONES ESTRADA.

RUBRO	PUNTAJE
A.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PRIVADA	07
B.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	11
EVALUACIÓN FINAL	
EN NÚMEROS (A + B)	18
EN LETRAS (A + B)	Dieciocho
- Excelente 20 - 19	Muy Bueno
- Muy Bueno 18 - 17	
- Bueno 16 - 14	
- Regular 13 a 11	
- Desaprobado 10 a menos	

Cajamarca, 03 de setiembre de 2025


Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Presidente


Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz.
Vocal


M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.
Secretario


Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Asesor

AGREDECIMIENTO

A Dios, por darme la fortaleza para seguir mis metas y la salud para alcanzarlas, siendo siempre la luz que me ha guiado en este arduo camino.

A mis padres, Nelly y Wilder, por su incondicional apoyo en todo momento. Su amor y sus enseñanzas me han brindado la perseverancia necesaria para superar las dificultades.

Un especial agradecimiento a mi asesor, el Dr. Ing. Francisco Huamán V., quien me brindó orientación y dedicación durante el desarrollo de esta tesis. Sus sugerencias fueron clave para culminar con éxito este trabajo.

DEDICATORIA

A mi madre, Nelly Estrada, quien siempre me ha apoyado en las buenas y en las malas, dándome consejos para nunca dejar de mirar hacia adelante y seguir sin detenerme.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.1.1. Contextualización.	2
1.1.2. Descripción del problema.	2
1.1.3. Formulación del problema	5
1.2. Justificación e importancia de la investigación.	5
1.3. Delimitación de la investigación	6
1.4. Limitaciones	6
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo General.....	7
1.5.2. Objetivos Específicos.....	7
II. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes.....	8
2.2. Bases teóricas.....	10
III. MATERIAL Y MÉTODOS.....	43
3.1. Área de estudio	43
3.1.1. Tramo de estudio	43
3.2. Materiales, Equipos y Softwares	45
3.3. Metodología.....	45
3.3.1. Diseño de investigación	45
3.3.2. Métodos de investigación.....	45
3.4. Población, muestra, unidad de análisis.....	46
3.5. Procedimiento	46
3.5.1. Reconocimiento de la zona de estudio	46
3.5.2. Levantamiento topográfico en el tramo de estudio.....	46
3.5.3. Puntos de Control para fotogrametría.....	47
3.5.4. Recolección de datos de suelos	48
3.5.5. Recolección de datos de caudales	48
3.5.6. Fase de laboratorio	49
3.5.7. Fase de gabinete.....	50

3.6.	Procedimiento	50
3.6.1.	Caracterización de la cuenca	52
3.6.2.	Recopilación de datos y procesamiento de información.....	53
3.6.3.	Estimación del Gasto sólido fondo.....	58
3.6.4.	Sedimento en suspensión	73
3.6.5.	Volumen de sedimentos	74
IV.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	77
4.1.	Parámetros geomorfológicos.....	77
4.2.	Caracterización de los sedimentos en el tramo de estudio	78
4.3.	Aforo del cauce de la quebrada Calispuquio	78
4.4.	Volumen de sedimentos de la quebrada Calispuquio	79
4.5.	Comparación de resultados de las fórmulas empíricas con muestras obtenidas en campo 79	
4.6.	Evaluación de la acumulación de sedimentos y residuos aguas arriba de la canalización del Jr. Nicolás Arriola.	81
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	85
	ANEXO 1: PANEL FOTOGRAFICO	90
	ANEXO 2. RESULTADOS DE LABORATORIO.....	98
	ANEXO 3. DATOS HIDROLOGICOS	99
	ANEXO 4. ANALIS GRANULOMETRICO	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geológico de la zona de estudio	3
Figura 2: Peligros geológicos en la cuenca alta de la quebrada Calispuquio	4
Figura 3: Variación de Pendientes durante la Erosión	13
Figura 4: balanza de Lane.....	14
Figura 5: Partes de un torrente.....	15
Figura 6: Grafica de curva granulométrica.....	18
Figura 7: Diagrama de Shields original en el sistema de ejes	25
Figura 8: Procesos de transporte de sedimentos.....	26
Figura 9: Trampa de arrastre de fondo	28
Figura 10: Vertedero rectangular.....	30
Figura 11: Distribución de la velocidad, la concentración de sedimentos y el caudal sólido.	34
Figura 12: Ángulo de reposo en función del diámetro y redondez de las partículas.....	41
Figura 13: Ubicación política de la zona de estudio.....	43
Figura 14: Ubicación satelital del tramo de estudio.	44
Figura 15: Esquema de procedimientos de la investigación.....	51
Figura 16: Mapa de delimitación de la cuenca de la quebrada Calispuquio.	52
Figura 17: Hidrograma de eventos monitoreados en la quebrada Calispuquio.	54
Figura 18 : Levantamiento fotogramétrico y generación del DEMS para el cauce de la quebrada Calispuquio en diferentes fechas	56
Figura 19: Cambios verticales en la elevación de la superficie de la quebrada Calispuquio entre octubre y enero.	57
Figura 20: Vista en planta del tramo de estudio	59
Figura 21: Perfil longitudinal del tramo de estudio en quebrada Calispuquio.	61
Figura 22: Ubicación de puntos de muestreo para análisis granulométrico.	62
Figura 23: Curvas granulométrica del cauce- quebrada Calispuquio.....	63
Figura 24: Curva granulométrica ponderada	65
Figura 25: Sección de la quebrada Calispuquio aguas arriba del punto de aforo.....	67
Figura 26: Concentración (mg/l) de sedimentos suspensión y caudales (l/s).....	74
Figura 27: Volumen de sedimentos acumulado en la canalización.....	75
Figura 28: Comparación de formulaciones teóricas.	80
Figura 29: Comparación de volúmenes de sedimentos por método y fecha	81
Figura 30: Variación de nivel en la canalización de la Calispuquio entre octubre y enero.	82
Figura 31: Colocación de Puntos de Control para fotogrametría	90
Figura 32: Primer levantamiento fotogramétrico para caracterizar el cauce.....	91
Figura 33: segundo levantamiento fotogramétrico con dron.....	91
Figura 34: tercer levantamiento fotogramétrico con dron	92
Figura 35: Inspección de la parte baja del tramo de estudio de la quebrada Calispuquio... ..	92
Figura 36: Inspección de la limpieza de la canalización quebrada Calispuquio aguas arriba del Jr. Nicolás Arriola en marzo del 2023	93
Figura 37: Extracción de las muestras para la granulometría del material subsuperficial ..	93
Figura 38: Elaboración de la trampa de sedimentos en el cauce.	94
Figura 39: Instalación del vertedero	94
Figura 40: Instalación de reglas limnimétricas.....	95
Figura 41: Toma de secciones del cauce para el método del flotador.....	95
Figura 42: Realización del tamizado para la Elaboración de la curva granulométrica	95
Figura 43: Peso de las muestras en suspensión	96
Figura 44: Toma de datos del laboratorio para el gasto sólido en suspensión	97
Figura 45: Vista de la superficie generada en Global Mapper	98

Figura 46: Datos de precipitación horaria en la estación UNC -CAJAMARCA	99
Figura 47: Curva de distribución de precipitación de la estación UNC -CAJAMARCA...	99
Figura 48: Datos de aforos en el vertedero.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de partículas según la American Geophysical Union.....	17
Tabla 2. Equivalencia de mallas y aberturas	19
Tabla 3. S.U.C.S; Suelos tipo grava	20
Tabla 4. Valores para el cálculo de la rugosidad según Cowan.	22
Tabla 5. Ecuaciones de transporte de sedimentos y rango de tamaños	32
Tabla 6. Parámetros para concentración máxima de solitos totales	35
Tabla 7. Comportamiento del Flujo en Función de la Concentración de Sedimentos	35
Tabla 8. Puntos de Control para fotogrametría.	48
Tabla 9. Parámetros geomorfológicos calculados	53
Tabla 10. Área de cauce con el caudal pico.	54
Tabla 11. Ancho de cauce	60
Tabla 12. Diámetros efectivos de la curva granulométrica ponderada.....	63
Tabla 13. Cálculo de peso específico	64
Tabla 14. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad según el método de Cowan.	66
Tabla 15. Características de la sección de control en el cauce de la quebrada Calispuquio	68
Tabla 16. Variables obtenidas del modelo hidráulico con el caudal dominante	69
Tabla 17. Resultado de gasto sólido en kg/s·m de la quebrada Calispuquio, para los aforos realizados.....	71
Tabla 18. Resultado de gasto sólido en kg/s de la quebrada Calispuquio, para los aforos realizados.....	72
Tabla 19. Resultado de gasto sólido en m ³ /s de la quebrada Calispuquio, para los aforos realizados.....	72
Tabla 20. Volumen acumulado en la canalización	75
Tabla 21. Gasto sólido de fondo.....	76
Tabla 22. Volumen de sedimentos para los caudales monitoreados	76
Tabla 23. Parámetros Geomorfológicos de la cuenca	77

Palabras clave:

Gasto sólido de fondo: Se refiere al transporte de sedimentos que se mueve a lo largo del fondo del cauce (como arena, grava o piedras), arrastrado por el flujo de agua.

Volumen de sedimentos: cantidad total de material sólido acumulado en el cauce durante un periodo determinado.

Erosión fluvial: Es el desgaste y remoción del material del cauce o de sus márgenes provocado por la acción del agua.

Fotogrametría: Es una técnica de medición basada en fotografías aéreas o imágenes de dron, utilizada para generar modelos del terreno.

RESUMEN

El presente estudio se desarrolló en el cauce de la quebrada Calispuquio, ubicada en la ciudad de Cajamarca, considerando un tramo de 406 metros aguas arriba de la canalización del Jr. Nicolás Arriola, dentro del cual se identificaron 140 metros canalizados con acumulación de sedimentos. Se registraron 11 eventos de lluvia entre abril y mayo de 2024, y se obtuvieron caudales mediante un vertedero rectangular de pared delgada calibrado con el método volumétrico, con lecturas del tirante realizadas cada 5 a 10 minutos. De estos eventos, 4 superaron el caudal dominante de 106.6 l/s, calculado a partir de una ecuación de regresión basada en registros hidrológicos. Para estimar el gasto sólido de fondo, se aplicaron fórmulas empíricas como las de Meyer-Peter y Müller, Schoklitsch, Parker, Klingeman y McLean, Mizuyama y Shimohigashi, y el método de Mora, Aguirre y Fuentes, empleando parámetros hidráulicos obtenidos en campo, como el diámetro medio del sedimento (20.58mm). Asimismo, se implementaron técnicas de medición en campo para estimar el volumen acumulado de sedimentos, obteniéndose un volumen de 18.97 m³ en un periodo de 70 días a partir del análisis comparativo de superficies, y 1.9 m³ en 6 días mediante una trampa de sedimentos. Además, se identificaron variaciones en la elevación del fondo del canal entre 0.2 y 0.6 metros en un área de 171 m². Entre los métodos evaluados, el de Parker, Klingeman y McLean presentó el mejor ajuste, con una sobreestimación respecto a los valores medidos, lo que proporciona información útil para la planificación de medidas de prevención y mitigación del riesgo por colmatación e inundaciones en esta zona de Cajamarca.

ABSTRACT

This study was conducted on the Calispuquio stream, located in the city of Cajamarca, focusing on a 406-meter reach upstream of the channelized section along Jr. Nicolás Arriola, of which 140 meters are concreted and exhibit sediment accumulation. Eleven rainfall events were recorded between April and May 2024. Flow rates were measured using a thin-walled rectangular weir calibrated with the volumetric method, with water depth readings taken every 5 to 10 minutes. Four of these events exceeded the dominant discharge of 106.6 L/s, calculated using a regression equation based on hydrological records. To estimate bedload transport, empirical formulas were applied, including those by Meyer-Peter and Müller, Schoklitsch, Parker, Klingeman and McLean, Mizuyama and Shimohigashi, and the method by Mora, Aguirre, and Fuentes, using field-derived hydraulic parameters such as the median sediment diameter (24.47 mm). Field techniques were also used to estimate the volume of accumulated sediments, yielding 18.97 m³ over a 70-day period from surface comparison and 1.9 m³ over 6 days using a sediment trap. Additionally, elevation changes of 0.2 to 0.6 meters were detected in a 171 m² area within the canal. Among the evaluated methods, the Parker, Klingeman and McLean approach showed the best fit, with a slight overestimation compared to field values, providing useful information for the planning of prevention and mitigation measures against siltation and flood risk in this area of Cajamarca.

CAPÍTULO I

I. INTRODUCCIÓN

En el norte del Perú, el volumen de sedimento de fondo representa una proporción considerable para la estimación del caudal sólido anual (Morera, S. 2014). Esto se debe a que los cauces de alta montaña o quebradas presentan una pendiente pronunciada y experimentan cambios significativos en su morfología a lo largo del tiempo (López, R. 2005). En la ciudad de Cajamarca, destacan afloramientos de flujos piroclásticos del Centro Volcánico Rumiorco, que yacen sobre lutitas y areniscas intensamente fracturadas pertenecientes a las Formaciones Carhuaz y Farrat. Estas unidades geológicas, ubicadas principalmente en las zonas altas, son altamente susceptibles a deslizamientos y erosión de laderas. En el movimiento de sedimentos se distingue el transporte de sólidos de fondo, cuando las partículas ruedan o se deslizan en el fondo del cauce, y en suspensión, aquellas partículas que se elevan (Rocha, A. 1998). Los procesos de transporte de sedimentos están en función del flujo a superficie libre, donde los sedimentos generados en la cuenca son transportados y depositados aguas abajo debido a una disminución de velocidad (Basile, P. 2018). Esta dinámica se intensifica durante eventos como El Niño, cuando se registra entre el 82% y el 97% del rendimiento de sedimentos en suspensión (Morera, S. et al. 2017).

Los sólidos de fondo controlan los cambios morfológicos en el cauce, reflejando el equilibrio entre la entrada y salida de sedimentos (Vázquez, D. 2013). En zonas de montaña con fuerte pendiente, donde los cursos de agua se caracterizan por su gran capacidad de arrastre (Andrango, C. & Piedra, J. 2014), las actividades humanas junto con las obras de contención y canalización generan un desequilibrio, aumentando el riesgo en las estructuras (Franco, F. 2013). Sin embargo, la comprensión de la mecánica del transporte de sedimentos en cauces de alta montaña, como las quebradas, es aún limitada (Rosell, J. et al. 2019).

Durante la planificación de proyectos hidráulicos, es crucial considerar tanto la carga sólida como los caudales, especialmente en eventos extremos. Los desbordamientos o deslizamientos en ríos con fondo móvil están estrechamente ligados a los elevados caudales líquidos y a la excesiva cantidad de sedimentos arrastrados (Basile, P. et al. 2016), lo que convierte la acumulación de sedimentos en un desafío para la gestión de proyectos hidráulicos, ya que las medidas para controlar el movimiento de sedimentos no siempre son eficaces ni accesibles.

La Quebrada Calispuquio es una microcuenca que nace en la zona suroeste de la ciudad de Cajamarca, en la parte alta de los barrios Santa Elena y Bella Vista. Actualmente, el cauce se encuentra canalizado desde la Av. Perú hasta su desembocadura en el río San Lucas, el cual se encuentra con una gran cantidad de sedimentos que reducen su capacidad hidráulica aguas arriba del jirón Nicolas Arriola y diversos sectores a lo largo de su recorrido.

Evaluar el gasto sólido y la colmatación en la quebrada Calispuquio es crucial debido a las lluvias intensas que se presentan entre los meses de noviembre y abril. Para ello, se aplicarán métodos empíricos que serán posteriormente validados y contrastados con datos obtenidos directamente en el lugar. Este análisis es fundamental para desarrollar estrategias de gestión y mitigación, así como para proteger las estructuras existentes en el cauce.

1.1. Planteamiento del problema.

1.1.1. Contextualización.

Los eventos climáticos extremos como El Niño han causado importantes inundaciones, impactando severamente la costa norte con fuertes lluvias (León, K. 2015). Cajamarca es uno de los departamentos más afectados por inundaciones, deslizamientos, huaicos y fuertes lluvias (Ordoñez, J. 2019). El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ha clasificado la quebrada de Calispuquio como zona de alto riesgo por inundaciones, erosión de los márgenes y deslizamientos. Dado que el movimiento de los sedimentos es constante, se recomienda realizar investigaciones para predecir el comportamiento de los sedimentos en la quebrada (Trigoso, B. 2018).

El cauce de la quebrada Calispuquio en 2016 se desbordó, provocando inundaciones que afectaron escuelas, lugares públicos, canales y servicios importantes (SEDACAJ 2022).

1.1.2. Descripción del problema.

En la ciudad de Cajamarca, la quebrada Calispuquio representa un foco constante de riesgos debido a los procesos de colmatación e inundación que se presentan de forma recurrente, especialmente durante la temporada de lluvias entre los meses de noviembre y abril. Estos problemas están relacionados principalmente con la erosión en los tramos superiores del cauce, donde la pendiente es pronunciada y el terreno presenta condiciones geológicas frágiles. La acumulación de sedimentos afecta directamente a la canalización existente aguas arriba del Jr. Nicolás Arriola, cuya capacidad hidráulica se ve reducida progresivamente. A esto se suma el impacto negativo del crecimiento urbano desordenado, el arrojo de residuos

Diversos estudios, han advertido sobre los riesgos que representa esta quebrada para la ciudad, y el INGEMMET ha calificado a la cuenca de Calispuquio como una zona crítica con alta susceptibilidad a inundaciones, erosión fluvial y deslizamientos.

SIMBOLOGÍA

- RÍO SAN LUCAS
- QDA. CALISPUQUIO
- QDA. ESTACIONAL
- CURVAS DE NIVEL
- ÁREA URBANA
- ⊛ LOCALIDAD

LEYENDA

ERATAMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	DEPÓSITO FLUVIAL (Qh-al)
		Pleistoceno	CENTRO VOLCÁNICO RUMIORCO (Po-fu/3)
Mesozoico	Cretácico	Inferior	FORMACIÓN FARRAT (Ki-fa)
			FORMACIÓN CARHUAZ (Ki-ca)
			FORMACIÓN SANTA (Ki-sa)
			FORMACIÓN CHIMU (Ki-chi)

INGEMMET
 INSTITUTO GEOLOGICO, MINERO Y METALURGICO
 Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
 EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS A NIVEL NACIONAL

GEOLÓGIA QUEBRADA CALISPUQUIO

Escala: 1/15000 Datum: UTM WGS 84 Zona 17 Sur
 Elaborado por: Diana Vigo B.

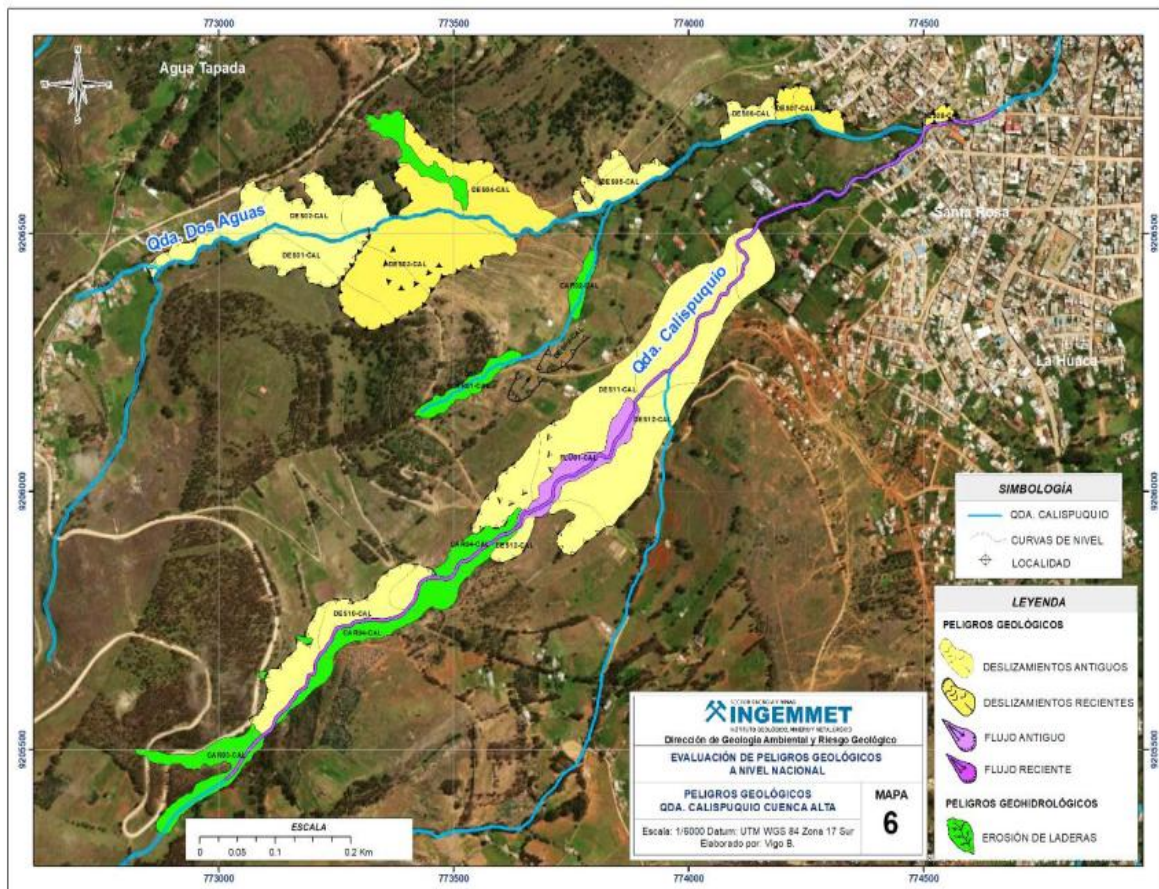
MAPA 3

En la figura 1 se presenta el mapa geológico correspondiente a la cuenca de la quebrada Calispuquio. Se identifican unidades geológicas particulares a lo largo de su recorrido. En la parte alta de la cuenca predominan depósitos piroclásticos del Centro Volcánico Rumiorco (Po-ru'3), mientras que en la zona media afloran areniscas muy fracturadas pertenecientes a

la Formación Farrat (Ki-fa); ambas unidades geológicas son altamente erosionables, lo que favorece los procesos de deslizamiento, flujo de detritos y generación de sedimentos que son transportados hacia la parte baja de la cuenca, donde se encuentran depósitos aluviales (Qh-al).

La quebrada Calispuquio presenta una susceptibilidad alta a movimientos en masa, especialmente en su cuenca alta, donde las pendientes son más pronunciadas y los suelos presentan baja cohesión.

Figura 2: Peligros geológicos en la cuenca alta de la quebrada Calispuquio



Fuente:(INGEMMET 2020)

En la figura 2 se han identificado deslizamientos frecuentes que afectan ambas márgenes del cauce, con coronas que alcanzan hasta 300 metros de ancho (INGEMMET 2020). Frente a este escenario, la necesidad de estimar el gasto sólido generado en la quebrada se vuelve prioritaria para la planificación de medidas de prevención, mitigación y gestión del riesgo, que permitan preservar la seguridad de la población y asegurar el adecuado funcionamiento de la canalización existente.

1.1.3. Formulación del problema

¿El gasto sólido de fondo y el volumen de sedimentos acumulados contribuyen a la colmatación y obstrucción del cauce de la quebrada Calispuquio, en el tramo ubicado aguas arriba de la canalización del Jr. Nicolás Arriola, durante la temporada de lluvias comprendida entre noviembre de 2023 y mayo de 2024?

1.2. Justificación e importancia de la investigación.

1.2.1 Justificación Científica.

Desde un enfoque científico, la presente investigación se enmarca dentro del método científico, iniciando con la observación de la problemática existente en la quebrada Calispuquio: la colmatación y obstrucción del cauce en el tramo canalizado aguas arriba del Jr. Nicolás Arriola. A partir de esta observación, se planteó la hipótesis de que el monitoreo y la medición en campo permitirán cuantificar el gasto sólido de fondo y el volumen de sedimentos acumulado, debido a que no existen estudios previos que determinen estos parámetros en la quebrada Calispuquio ni investigaciones regionales enfocadas en quebradas canalizadas, lo que constituye un vacío de conocimiento sobre los procesos de transporte y deposición en cauces de alta pendiente. Esta investigación contribuye a ampliar el entendimiento de los procesos de colmatación y su relación con el transporte de sedimentos de fondo, fenómeno que reduce la capacidad hidráulica y de conducción del canal.

1.2.2 Justificación Técnico – Práctica.

Desde una perspectiva técnico-práctica, la presente investigación, aplica conocimientos adquiridos, tales como Hidrología, Hidráulica Fluvial, Topografía y Mecánica de Suelos, integrando aspectos teóricos y prácticos en un contexto real de análisis hidráulico y sedimentológico en quebradas. El estudio permitirá estimar cuantitativamente el volumen de sedimentos acumulados en el tramo canalizado de la quebrada Calispuquio, así como el gasto sólido de fondo generado durante eventos de avenida. La validación de fórmulas empíricas con datos obtenidos en campo proporcionará información y metodologías que podrán ser utilizadas en futuras investigaciones relacionadas con el transporte y acumulación de sedimentos en microcuencas con condiciones similares, contribuyendo a fortalecer el conocimiento técnico aplicado en este tipo de sistemas hidráulicos.

1.2.3 Justificación Institucional y Personal.

Desde una perspectiva institucional, la presente investigación se enmarca en el compromiso de la Universidad Nacional de Cajamarca por aportar al conocimiento y a la generación de investigaciones orientadas a la solución de problemáticas locales y regionales. El estudio aborda la colmatación y obstrucción en cauces de alta pendiente, problemática que afecta la capacidad hidráulica y la seguridad de la infraestructura. Los resultados obtenidos constituyen un avance en el ámbito de la hidráulica fluvial y la sedimentología, al generar información técnica validada que podrá servir como base para futuros estudios con fines académicos, técnicos o de consultoría. Asimismo, contribuye al desarrollo de herramientas que apoyen la gestión de cauces en zonas de montaña.

A nivel personal, representa un paso más en la formación profesional dentro del sector hídrico, realizando una valiosa práctica relacionada con el análisis del transporte de sedimentos en cuencas de alta montaña. Esto también sugiere que los resultados pueden implementarse en planes que apunten a mejorar la calidad de vida de la población ubicada en los márgenes del cauce.

1.3. Delimitación de la investigación

La investigación se desarrolla en la cuenca de la quebrada Calispuquio, ubicada en la ciudad de Cajamarca. El estudio se enfoca en un tramo del cauce de 406 m, situado aguas arriba de su intersección con el Jr. Nicolás Arriola, el cual comprende una sección canalizada con antecedentes de desbordes y acumulación de sedimentos, así como una sección sin canalizar, afectada por el arrojo de residuos sólidos, desmontes y procesos de socavación.

La recopilación de datos se realizará durante la temporada de lluvias, periodo en el que se registran mayores caudales. Para estimar el gasto sólido de fondo se utilizarán técnicas de monitoreo en campo, como los levantamientos fotogramétricos y el uso de una trampa de sedimentos. Adicionalmente, se aplicarán fórmulas empíricas en gabinete con el fin de comparar y validar los resultados obtenidos.

1.4. Limitaciones

La falta de registros históricos de sedimentos y caudales en la zona de estudio impide establecer tendencias a largo plazo. Asimismo, debido a que la quebrada solo presenta caudales significativos durante la época de avenidas, las mediciones y monitoreos solo pueden realizarse entre los meses de noviembre y mayo.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Estimar el gasto sólido de fondo y el volumen de sedimentos acumulado en el cauce de la quebrada Calispuquio, en el tramo ubicado aguas arriba de la canalización del Jr. Nicolás Arriola, durante la temporada de lluvias comprendida entre noviembre de 2023 y mayo de 2024.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros geomorfológicos mediante información cartográfica de la quebrada Calispuquio.
- Caracterizar los sedimentos en el tramo de estudio.
- Aforar el cauce de la quebrada Calispuquio en los meses de abril y mayo del 2024.
- Estimar el gasto sólido de fondo y en suspensión utilizando fórmulas empíricas.
- Estimar el volumen de sedimentos de la quebrada Calispuquio.
- Comparar los resultados de las fórmulas con datos obtenidos en campo.
- Evaluar la acumulación de sedimentos y residuos aguas arriba de la canalización del Jr. Nicolás Arriola.

CAPÍTULO II

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. A nivel internacional

En el estudio titulado “Dynamics of Bed Load Transport in the Parsęta River Channel, Poland”, se evaluó el transporte de sedimentos de fondo en tres tramos del río Parsęta, caracterizados por distintos tipos de secciones transversales: tramos rectos y curvas con radios de curvatura altos y bajos. Se consideraron caudales medios anuales de 4.6, 13.6 y 35.7 m³/s, y un tamaño medio de partícula comprendido entre 0.24 mm y 0.81 mm. El transporte de sedimentos se presentó principalmente en forma de rizaduras sinuosas y en forma de lengua, y ocasionalmente como dunas o barras. Utilizando una versión modificada de la fórmula de Meyer-Peter & Müller, se estimaron tasas de transporte de sedimentos de fondo que oscilaron entre 0.15 y 0.78 kg/s. Se observó que el transporte era mayor en tramos rectos respecto a las curvas, y que la movilidad del material de fondo abarcaba entre el 39% y el 90% del ancho del cauce, con un promedio del 70%, independientemente del nivel del agua (Zwoliński, Z. 1993).

En el estudio "Transporte de fondo potencial mediante estudio en modelo físico de lecho móvil", desarrollado en el marco del proyecto hidroeléctrico HidroSanBartolo, ubicado en el río Negro al sur del Ecuador, se evaluaron cinco fórmulas para estimar el transporte de sedimentos de fondo: Schoklitsch, Meyer-Peter & Müller, Van Rijn y Nielsen (en sus versiones simplificada y semiempírica), utilizando un modelo físico de lecho móvil a escala reducida. Las tasas de transporte estimadas fueron validadas para diferentes caudales, destacando que para un caudal formativo de 50 m³/s las tasas obtenidas fueron: 662 kg/s con Nielsen simplificada, 774 kg/s con Meyer-Peter & Müller, 470 kg/s con Van Rijn y 230 kg/s con Schoklitsch. Los resultados evidenciaron que la ecuación simplificada de Nielsen fue la que mejor representó los procesos de erosión y acreción del cauce modelado, mientras que la fórmula de Meyer-Peter & Müller subestimó el transporte en un 15% y la de Van Rijn fue descartada por no representar adecuadamente el diámetro de sedimento del caso de estudio (Pacheco, E. & Carrillo, V. 2014).

2.1.2. A nivel nacional

La tesis titulada “Evaluación comparativa del transporte de sedimentos de fondo en el río Tumbes durante El Niño Costero y La Niña Costera: 2017-2018”, identificó las principales diferencias hidráulicas y sedimentológicas de dos importantes fenómenos climáticos: El Niño Costero y La Niña Costera, que ocurrieron en 2017 y 2018 en la estación hidrométrica "El Tigre" en la región de Tumbes. Utilizando las fórmulas de Meyer-Peter y Müller, Bagnold, y Camenen para el transporte de sedimentos de fondo. Se estimó una capacidad de transporte de hasta 0,8 kg/m/s para marzo de 2017, en el año de El Niño Costero, durante La Niña Costera, las tasas de transporte de sedimentos estimadas con las mismas ecuaciones fueron considerablemente menores, alcanzando hasta 0.03, 1.13, y 0.18 kg/s. La investigación resalta la importancia de monitorear los sedimentos de los ríos para desarrollar estrategias efectivas de gestión y mitigación de riesgos asociados a eventos climáticos extremos (Chapoñan, K. 2023).

La tesis titulada “Análisis y evaluación comparativa experimental y teórica del gasto sólido de fondo y suspensión en el río Sondondo, Sucre - Ayacucho – 2016” presenta la cuantificación experimental del gasto sólido de fondo y en suspensión. Mediante el uso del muestreador Helley-Smith se realizaron mediciones directas de sólidos de fondo, y se tomaron muestras para evaluar los sólidos en suspensión. Se aplicaron diversos modelos teóricos para estimar el gasto sólido: Du Boys, Schoklitsch, Einstein y Brown, Meyer-Peter y Müller, y Levi para fondo; y Garde-Pande, Samaga y Benedict-Banuni para suspensión. Los resultados mostraron que todos los modelos tienden a sobrestimar el transporte sólido; sin embargo, la fórmula de Meyer-Peter y Müller fue la que presentó el valor más representativo para el fondo, con un estimado de 26,648.26 kg/s, mientras que para la suspensión, la fórmula de Benedict-Banuni fue la más adecuada, con un valor de 1,563.20 kg/s (Janampa, J. 2016).

2.1.3. A nivel local

En la tesis titulada “Modelamiento hidráulico de la quebrada Calispuquio-tramo ciudad de Cajamarca-ciudad Universitaria, con fines de prevención de inundaciones” busca identificar las áreas inundables ante una máxima avenida en la quebrada Calispuquio mediante modelamiento hidráulico en un tramo de 3.2 km en la zona urbana. Se calcularon caudales de máxima avenida para períodos de retorno de 50, 100, 200, 300 y 500 años, así como también una simulación en el software IBER, donde se obtuvo un área de inundación total

de 10.8 ha, con un tirante máximo de 2.1 m, considerado de muy alto riesgo (Trigoso, B. 2018).

En la tesis titulada “Gasto sólido de fondo aguas arriba de la captación río Porcón - Cajamarca 2020”, se estimó el gasto sólido de fondo del río Porcón mediante fórmulas empíricas y se compararon los resultados con mediciones obtenidas a través de una trampa de sedimentos instalada aguas arriba de la captación. Para ello, se realizaron aforos en los meses de febrero y marzo de 2020. Las fórmulas empleadas fueron las de Meyer-Peter y Müller, Einstein y Einstein-Brown, Pernecker y Vollmers, Parker-Klingeman-McLean y Mizuyama-Shimohigashi. Los resultados obtenidos mostraron variaciones importantes. Entre todas, las que más se aproximaron al valor medido en campo fueron las fórmulas Mizuyama-Shimohigashi, con valores entre 0.40 y 0.68 kg/s y Parker-Klingeman-McLean, con estimaciones entre 2.5 y 44.87 kg/s, siendo esta última la que más se ajusta con las mediciones reales (Rudas, J. 2022).

En la tesis titulada “Transporte de sedimentos de fondo y volumen generado aguas arriba de la captación del Chicche – Cajamarca 2016” se centró en predecir el transporte del suelo del fondo en el río Chonta, especialmente sobre El Chicche. Para ello, se utilizan diversas fórmulas donde se obtienen desde 675 kg/s según la fórmula de Parker, Klingeman y McLean, hasta 9522 kg/s según la fórmula de Bagnold. Se determinó que el modelo de Parker, Klingeman y McLean era el que más acercó a las mediciones en el sedimentador de la captación de la C.H. El Chicche (Valdivia, R. 2018).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un área de terreno donde todas las aguas de precipitaciones, deshielos o acuíferos convergen y fluyen hacia un solo punto de descarga, como un río, lago u océano, donde existe una conexión entre el entorno y las poblaciones que lo habitan. Los sedimentos y contaminantes que afectan el agua, la capacidad de adaptación de los ecosistemas y la calidad de vida de sus habitantes permiten entender el impacto de la actividad humana en la cuenca (López, R. & Patrón, E. 2013).

2.2.1.1 Parámetros Geomorfológicos

En las ciencias de la Tierra, se reconoce que la geomorfología depende de la interacción entre la geología, el clima y el movimiento del agua sobre la superficie terrestre. Las

características físicas de una cuenca hidrográfica constituyen un conjunto de variables que influyen significativamente en su comportamiento hidrológico, tanto en lo que respecta a las entradas como a las respuestas del sistema.

Por ello, el análisis sistemático de los parámetros geomorfológicos resulta de gran utilidad en la ingeniería hidrológica, ya que permite caracterizar cuencas incluso en zonas con escasa información, facilitando la estimación de variables clave para el diseño y modelación hidrológica.

a) Área y Perímetro de Drenaje

El área de la cuenca tiene importancia porque sirve de base para la determinación de otros elementos como tiempos de escurrimiento, coeficientes de escorrentía, caudales, etc. Siendo este último el más susceptible a la modificación de este parámetro, ya que ambos crecen de manera proporcional. Para hallar el área, se dibujan líneas interpretando la forma del relieve donde se aprecie la división de agua, lo que representan los contornos (Gaspari,F. et al. 2010).

El perímetro de la cuenca, en cambio, se utiliza como un dato de entrada que permite inferir la irregularidad de las áreas de aporte a partir de coeficientes de forma. Se define como la longitud de la divisoria de aguas.

b) Pendiente del Cauce Principal

La pendiente del cauce principal se define como el cambio de elevación por unidad de distancia a lo largo del curso del río. Para fines hidrológicos y de modelación, es necesario contar con un valor único que represente adecuadamente la inclinación del cauce, ya sea en todo su recorrido o en un tramo específico. Este parámetro resulta fundamental en los procesos de degradación fluvial y en los cálculos relacionados con avenidas y crecidas(Gaspari,F. et al. 2010).

c) Longitud del cauce principal

Es la longitud del cauce más largo dentro de la cuenca. Su recorrido se mide desde la cabecera, considerando las sinuosidades o cambios de dirección, hasta el punto de interés. Corresponde a la longitud de su cauce principal y representa la distancia que el río atraviesa entre el punto de mayor distancia topográfica y el punto de desagüe.

d) Pendiente media del cauce principal y de la cuenca

Es la relación entre la altura de su cauce (h) y su longitud (L)

$$j = \frac{h}{L} \quad (1)$$

e) Forma de la cuenca

Las cuencas hidrográficas presentan distintas formas según su estructura en planta, lo que permite evaluar la escorrentía en el cauce principal (Rodríguez, H. 2010).

Para evaluar la forma de la cuenca se obtienen los parámetros de elongación, circularidad y el índice de Gravelius.

La **elongación (E)** se define como:

$$E = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L} \quad (2)$$

Donde, A es el área de la cuenca y L la longitud del cauce principal. Si E =1, la cuenca es circular; si el valor se aproxima a 0, la cuenca se vuelve más alargada.

La **circularidad (C)** se define como:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3)$$

Donde, P: es el perímetro de la cuenca. Si el valor de C se aproxima a 1, la cuenca tiene una forma circular; este valor disminuye a medida que la cuenca se vuelve más alargada.

El **índice de Gravelius (Kc)** se expresa como:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

Si Kc se aproxima a 1 se aproxima a 1, la cuenca tendrá una forma circular, lo que indica una mayor tendencia a las crecidas. Kc<1, la cuenca tendrá una forma más alargada (Rodríguez, H. 2010).

f) Densidad de drenaje

Es un parámetro que nos indica si la cuenca drena rápidamente o de manera pobre. Siendo valores aproximados a 3.5 km/km² para cuencas bien drenadas y 0,5 km/km² para con drenaje pobre.

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (5)$$

Donde:

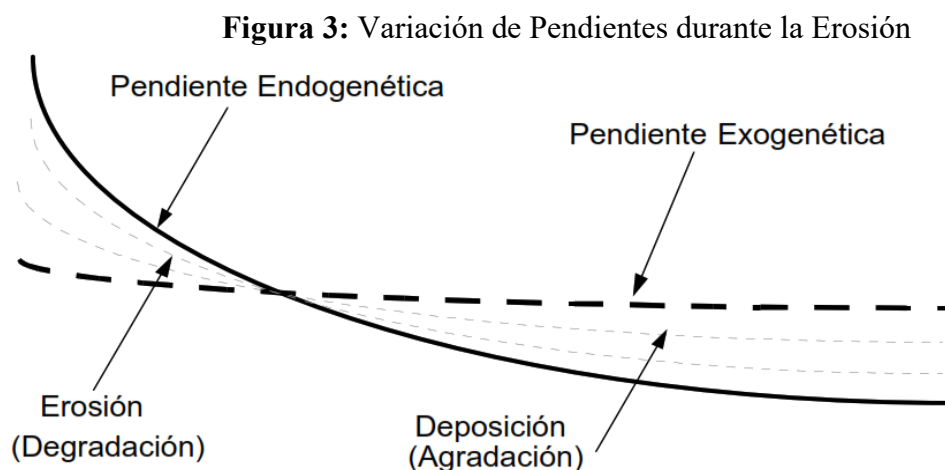
Dd = Densidad de Drenaje (km/km²)

Li = Longitud total de los cursos de agua

2.2.2. Erosión y deposición

La erosión en un curso de agua se refiere al retroceso progresivo de las orillas o al descenso del fondo del cauce, producto de procesos de dinámica fluvial que pueden originarse de forma natural o como consecuencia de la intervención humana. Estos procesos pueden acelerarse debido a actividades antropogénicas, como la remoción de la cobertura vegetal que actúa como capa protectora del suelo (Julien, P. 2010; Vide, J. 2003).

Los procesos de erosión y deposición pueden ser generados por agentes como las corrientes de agua, los glaciares, el viento o las olas, los cuales provocan el desgaste continuo del suelo y de las rocas (WMO2012).

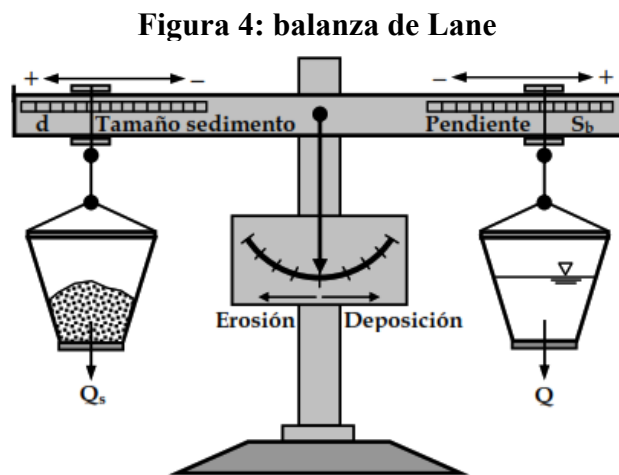


Fuente: (Rocha, A. 1998)

La erosión produce modificaciones en la pendiente del terreno, lo que conlleva a procesos de degradación o deposición en distintas zonas del cauce (ver Figura 3). Es importante destacar que los sedimentos erosionados no se incorporan de manera inmediata al flujo fluvial, dado que su arrastre puede tomar varios años. Sin embargo, los sedimentos provenientes de los márgenes del cauce o de eventos como deslizamientos ingresan de forma inmediata a la corriente (Hudson, N. 1997).

2.2.3. Condición de equilibrio

La condición de equilibrio en un cauce fluvial puede analizarse cualitativamente mediante la analogía de una balanza propuesta por Lane (1955), la cual establece que los procesos de erosión o acreción dependen del balance entre el caudal, la pendiente del cauce y el tamaño del sedimento. Esta representación ha sido utilizada para evaluar de manera conceptual el comportamiento morfológico de tramos de ríos aluviales (Basile, P. 2018).



Fuente: adaptado de Lane (1955), citado por (Basile, P. 2018)

La figura 4 representa gráficamente la relación cualitativa entre las variables clave que determinan el comportamiento morfológico de un río. En situaciones de desequilibrio, un cauce puede presentar un exceso de sólidos o una erosión significativa, siendo la pendiente del cauce la que presenta un papel crucial para restablecer el equilibrio, considerando el tamaño de las partículas (Vide, J. 2003).

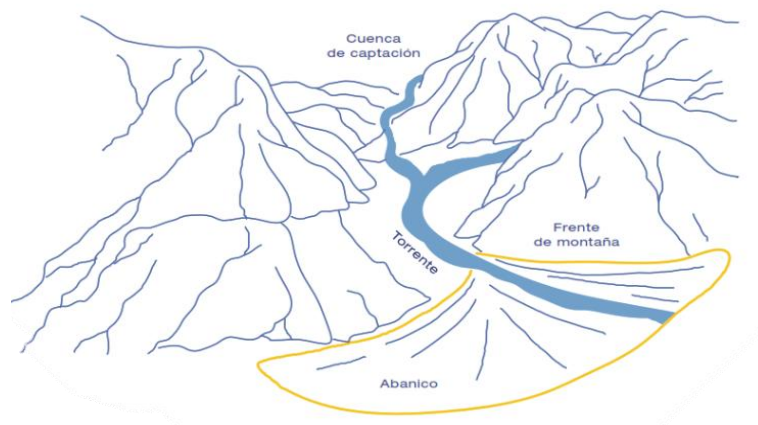
2.2.4. Morfología Fluvial para ríos de montaña

Los ríos de montaña presentan una gran variabilidad en su morfología debido al constante movimiento de sedimentos, los cuales pueden ser erosionados y transportados aguas abajo. En este tipo de ríos, los procesos de erosión y deposición dependen en gran medida del régimen de caudales. La elevada sedimentación puede alterar físicamente las características hidráulicas del cauce, modificando su geometría y dinámica. Además, el transporte de sedimentos de fondo tiende a ser más significativo que en los ríos de llanura, mientras que el transporte en suspensión es relativamente menor (López, R. 2005; Ongley, E. 1997).

En zonas montañosas se presentan flujos de agua denominados torrentes cuando el cauce tiene una pendiente mayor al 5%, en cauces con pendientes entre 3% y 5% de régimen torrencial en el piedemonte, lo que genera un gran potencial erosivo, provocando un gasto sólido que arrastra el material a las zonas bajas (Morassutti, G. 2021).

En cauces inferiores donde las pendientes están entre 0.5 % a 2% están compuestos por arenas y gravas, en el tramo medio para gradientes entre el 2 % a 4 %, el lecho presenta gravas medianas-gruesas y guijarros, Para pendientes entre el 4 % y 6 % del tramo superior, el sedimento del lecho es muy grueso, se observan guijarros grandes y cantos rodados (Basile, P. 2018).

Figura 5: Partes de un torrente



Fuente: Adaptado de Lustig (1965), citado por (Ruben, A. et al 2023).

En la Figura 5 se representa esquemáticamente la morfología típica de un torrente. El cual se compone de tres partes: la cuenca de recepción, que tiene un alto nivel de erosión; el canal de desagüe, que transporta principalmente sedimentos; y el abanico o cono de deyección, donde ocurre la sedimentación (Vide, J. 2003).

2.2.4.1 Quebrada

Dentro de las categorías de cauces naturales la quebrada es el curso de agua más pequeño, en el cual el flujo superficial es impulsado por la gravedad. En varias regiones de Hispanoamérica se les denomina quebradas o arroyos a los ríos efímeros (Vide, J. 2003).

Se trata de arroyos de montaña con fuertes pendientes y régimen intermitente, que fluyen solo unos días al año durante crecidas violentas e intensas precipitaciones; solo las más grandes tienen un flujo permanente (Peltre, P. 1989),.

2.2.4.2 Clasificación de los ríos

Los ríos pueden clasificarse de diversas formas, según los factores que intervienen en la dinámica de sus cauces. Una de las primeras clasificaciones fue propuesta por Davis (1899), quien los clasificó los ríos por su edad en jóvenes, maduros y viejos.

Los ríos jóvenes son característicos de casi todos los ríos de montaña y sus tributarios, estos cauces, generalmente formados por materiales fracturados que pueden o no ser erosionables, en los ríos maduros, el valle fluvial se ensancha y las pendientes longitudinales se suavizan, los ríos maduros tienden a desarrollar llanuras de inundación angostas y meandros, finalmente, los ríos viejos con valles fluviales y pendientes menores (Apaclla, N. 2014).

Según el material del cauce, estos se subdividen en varias categorías: los cauces cohesivos están formados principalmente por arcillas y limos; los cauces aluviales se clasifican según el tamaño de las partículas, en boleó y cantos rodados, grava y arena, y arenosos si D_m es menor a 2 mm; los cauces rocosos tienen roca expuesta o cubierta por un revestimiento aluvial; y los cauces acorazados cuentan con una capa protectora de material grueso en la superficie (Marcacuzco, J. 2017).

2.2.5. Caudal dominante

El caudal dominante es el flujo más significativo que moldea el cauce el cual depende de la frecuencia y magnitud de la fuerza tangencial aplicada algunos autores indican que este caudal se presenta aproximadamente dos veces al año o un para un tiempo de retorno de 1.4 años, aunque puede variar dependiendo de la zona, siendo fundamental para determinar la geometría hidráulica del río.

Siempre existe una relación entre el caudal y la forma del cauce señala que las pocas crecidas anuales representan la descarga dominante y son fundamentales para la formación del lecho, lo que es crucial para entender el comportamiento fluvial (Rocha, A. 1998).

La descarga dominante es una representación simplificada de un intervalo de caudales que moldean el cauce, condensada en un único valor, aplicable a cauces aluviales en equilibrio. Este concepto también puede ser adecuado para ríos intermitentes, bajo ciertas restricciones, con el objetivo de establecer una relación con la geometría del cauce (Basile, P. 2018).

La ecuación de regresión para obtener la descarga dominante fue estudiado por Williams (1978) usando 233 datos de varios ríos (Apaclla, N. 2014).

$$Q = 4 \times A_f^{1.21} S^{0.28} \quad (6)$$

Q= Caudal dominante, en pies³/s

A_f= Área del cauce con caudal dominante, en pies²

S=pendiente de la superficie de agua (pie/pie).

2.2.6. Propiedades de los Sedimentos

Las partículas de sedimento que se originan en una cuenca o en el cauce se clasifican en cohesivas y no cohesivas. Estas abarcan desde grava hasta arcilla, y son transportadas por la fuerza del agua, dependiendo de sus características físicas. Las partículas no cohesivas, como la arena y la grava, ofrecen resistencia al movimiento principalmente por su peso y forma, ya que no presentan cohesión interna. Particularmente, las partículas de arena (0.06 mm a 2 mm) y de grava (2 mm a 20 mm) son las más relevantes para el análisis hidráulico de los cauces aluviales (Engelund, F., Hansen, E. 1967; Ramirez, R. 2021; Rocha, A. 1998).

Los procesos de erosión, transporte y depósito de la cuenca se evidencian en las características de los sedimentos. Además, los diámetros representativos de los sedimentos de fondo sirven para el cálculo del transporte de sedimentos (Apaclla, N. 2014).

2.2.6.1 Tamaño de partícula

En los cauces fluyen distintos tipos de partículas, donde el tamaño viene a ser una dimensión que lo representa. Existen varios análisis para hallar el tamaño de las partículas, normalmente se guían por diámetro para partículas mayores de 0,06 mm (Engelund, F., Hansen, E. 1967).

Los guijarros y los cantos rodados pueden medirse directamente, mientras que las gravas, arenas se miden en mallas, limos y arcillas y se analizan en laboratorio (Ramirez, R. 2021; Rocha, A. 1998), la clasificación de las partículas se presenta en el cuadro siguiente:

Tabla 1. Clasificación de partículas según la American Geophysical Union

Nomenclatura	Intervalo (mm)	Nomenclatura	Intervalo (mm)
Arcilla muy fina	0.00024 - 0.00050	Limo muy fino	0.004 - 0.008
Arcilla	0.0005 - 0.001	Limo	0.008 - 0.016
Arcilla media	0.001 - 0.002	Limo medio	0.016 - 0.031
Arcilla gruesa	0.002 - 0.004	Limo grueso	0.031 - 0.62
Arena	0.062 - 0.125	Grava	2.0 - 4.0
Arena	0.125 - 0.25	Grava	4.0 - 8.0
Arena media	0.25 - 0.50	Grava media	8.0 - 16.0
Arena gruesa	0.50 - 1.00	Grava gruesa	16.0 - 32.0

Nomenclatura	Intervalo (mm)	Nomenclatura	Intervalo (mm)
Arena muy gruesa	1.00 - 2.00	Grava muy gruesa	32.0 - 64.0

Fuente: (Marcacuzco, J. 2017)

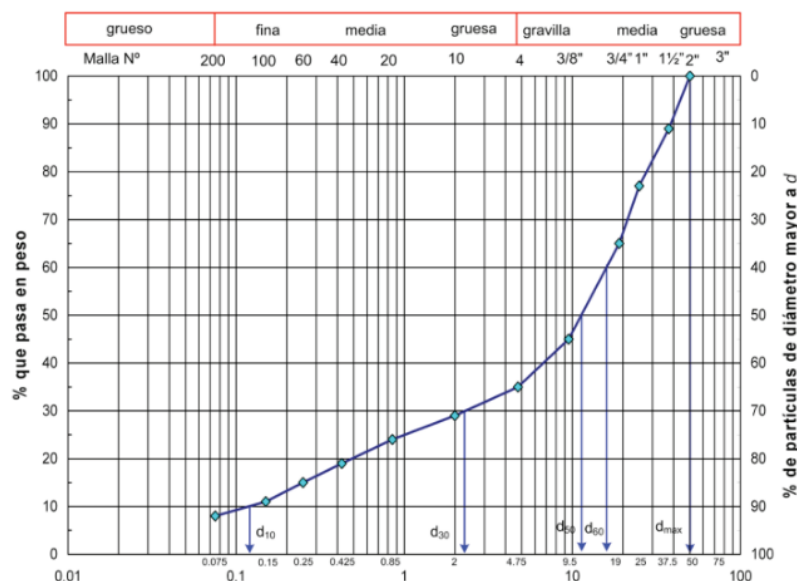
2.2.6.2 Granulometría

Los sedimentos transportados por la corriente se clasifican según su tamaño. Para determinar un tamaño representativo, se realiza un análisis granulométrico, el cual permite conocer la distribución del tamaño de las partículas y obtener valores característicos para su uso en cálculos de transporte de sedimentos.

Existen diversos tipos de diámetros representativos empleados según el enfoque del autor. El diámetro D_{50} , que corresponde al tamaño por debajo del cual se encuentra el 50 % del peso acumulado de las partículas más finas, es uno de los más utilizados como valor representativo. Sin embargo, también se emplean otros diámetros como el de D_{35} y el de D_{55} , que son utilizados para caracterizar la carga del lecho y estimar la rugosidad hidráulica (Engelund, F. & Hansen, E. 1967).

Por su parte, la ecuación de Einstein utiliza el D_{35} como diámetro característico, Schoklitsch considera el D_{40} , mientras que Shields utiliza D_{50} para el análisis del inicio de movimiento (Marcacuzco, J. 2017).

Figura 6: Grafica de curva granulométrica.



Fuente: (Villalaz, C. 2007, p. 37)

La curva granulométrica representa la relación entre los diámetros y los porcentajes acumulados, mostrando que parte de la muestra es más fina que el diámetro representativo (Engelund, F.& Hansen, E. 1967).

El diámetro de abertura de cada tamiz está establecido por la norma ASTM. Se utilizan para crear la curva granulométrica, mediante un ensayo con los distintos tamices apilados y sometidos a vibración, lo que provoca la retención de las partículas a distintos niveles.

Tabla 2. Equivalencia de mallas y aberturas

Malla N°	Abertura (mm)
1"	25
3/4"	19
3/8"	9.5
# 4	4,75
# 10	2,000
# 20	0,850
# 40	0,425
# 60	0,250
#100	0,150
#200	0,075

Fuente: (Villalobos, F. 2016, p. 36)

Para clasificar los suelos, se utiliza los sistemas de clasificación, siendo los que permiten describir sus características de forma concisa. Uno de los más utilizados es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, por sus siglas en inglés), el cual divide los suelos en dos grandes categorías: suelos de grano grueso y suelos de grano fino.

Los suelos que tengan menos de 50% de partículas que pasen la malla N°200 se clasifican como grava (G) o arena (S). Por otro lado, los suelos en los que más del 50% de las partículas pasan por la malla N°200 se simbolizan como limos (M) o arcillas (C). Además, se incluyen categorías específicas como limos orgánicos y arcillas orgánicas (O), así como suelos de origen orgánico, como los turbos y lodos (Pt). Otros símbolos utilizados en este sistema son: W, para suelos bien graduados; P, para suelos mal graduados; L, para suelos de baja plasticidad ($LL < 50$); y H, para suelos de alta plasticidad ($LL > 50$).

Tabla 3. S.U.C.S; Suelos tipo grava

Símbolo de Grupo	Criterios
GW	Menos de 5% pasa la malla no. 200, $C_u = D_{60} / D_{10}$ mayor que o igual que 4, $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3.
GP	Menos de 5% pasa la malla no. 200, no cumple ambos criterios para GW.
GM	Más de 12% pasa la malla no.200, los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12) o el índice de plasticidad menor que 4.
GC	Más de 12% pasa la malla no.200, los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 2.12), índice de plasticidad mayor que 7.
GC-GM	Más de 12% pasa la malla no.200, los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL – ML en la figura 2.12.
GW-GM	El porcentaje que pasa por la malla no. 200 está entre 5 y 12, cumple los criterios para GW y GM.
GW-GC	El porcentaje que pasa por la malla no. 200 está entre 5 y 12, cumple los criterios para GW y GC.
GP-GM	El porcentaje que pasa por la malla no. 200 está entre 5 y 12, cumple los criterios para GP y GM.
GP-GC	El porcentaje que pasa por la malla no. 200 está entre 5 y 12, cumple los criterios para GP y GC.

Fuente: (Macias, A. et al. 2020)

2.2.6.3 Densidad aparente (ρ_a)

Es la relación entre la masa por unidad de volumen. Un valor promedio para la densidad de los sedimentos es 2650 kg/m³ (Basile, P. 2018).

$$\rho_a = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{P_s}{V_o} \quad (7)$$

Donde:

P_s = Peso seco de la muestra extraída en campo, en kg.

V_o = Volumen que la muestra ocupaba en campo, en m³

2.2.6.4 Densidad relativa o Peso específico

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_f - V_i} \quad (8)$$

γ_s = Peso específico de sedimentos, en kg/m³

W_s = Peso seco de la muestra, en kg.

V_i = Volumen del agua (inicial), en m³

V_f = Volumen del agua más la muestra (final), en m³

El peso específico del sedimento se puede expresar, como:

$$\gamma_s = g\rho_s \quad (9)$$

g : Aceleración de la gravedad. ($m^2.S^{-1}$)

ρ_s : Densidad de la partícula ($Kg.m^{-3}$)

El peso específico es de 26 kN/m^3 y el peso específico sumergido es de 16 kN/m^3 en la mayoría de los sedimentos naturales (Basile, P. 2018), el peso sumergido es igual a:

$$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma \quad (10)$$

γ'_s = el peso específico sumergido

La relación entre peso específico del sedimento y del agua se define como gravedad específica es:

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma} = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (11)$$

G : gravedad específica

La densidad relativa de la partícula dentro del agua.

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (12)$$

γ = el peso específico del agua. (kgf /m^3)

2.2.6.5 Velocidad de caída

La velocidad de caída de las partículas sedimentarias está influenciada por diversos factores, como el tamaño, la forma, la densidad del sedimento y la viscosidad del fluido circundante. Cuando una partícula presenta una densidad mayor que la del medio líquido, tiende a precipitarse hasta alcanzar una velocidad de caída de equilibrio, momento en el cual la fuerza de arrastre y el peso se equilibran. Estas características han sido ampliamente descritas en estudios sobre mecánica de sedimentos (Engelund, F. & Hansen, E. 1967; Julien, P. 2010).

2.2.6.6 Coeficiente de rugosidad

Es un parámetro necesario para resolver la ecuación de Manning, muestra la mayor dificultad para su elección debido a que no existe un solo método que estime la resistencia al flujo en el cauce (Chow, V. 1959).

Cálculo de “ n ” por Cowan Arcement Schneider (1956)

Se desarrolló un método para evaluar el coeficiente de rugosidad en canales naturales.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad (13)$$

Dónde:

n_0 = Coeficiente (n) básico.

n_1 = Coeficiente añadido por irregularidades del cauce.

n_2 = Coeficiente añadido por variaciones en la forma y tamaño del cauce.

n_3 = Coeficiente añadido por obstrucciones.

n_4 = Coeficiente añadido por vegetación y condiciones de flujo.

m = Corrección por la cantidad de meandros en el cauce.

Tabla 4. Valores para el cálculo de la rugosidad según Cowan.

Condiciones de cauce			Valores	
Tipo de material en el perímetro del canal	Tierra	Arena, limo, y arcilla	n_0	0.020
	Corte en roca	Afloramiento de la roca		0.025
	Grava fina	Grava de hasta 8 mm de diámetro		0.024
	Grava gruesa	Grava de más de 8 mm de diámetro		0.028
Grado de irregularidades en la superficie	Liso	La mejor condición	n_1	0.000
	Menor	Canales bien dragados, con pendientes laterales poco erosionadas		0.005
	Moderado	Canales poco dragados, con pendientes laterales moderadamente erosionadas		0.010
	Severo	Canales muy erosionados, con superficies altamente irregulares y/o excavadas en roca gruesa		0.020
Variaciones en la forma y tamaño de la sección transversal	Gradual	Variaciones suaves o pequeñas	n_2	0.000
	Alternadas ocasionalmente	Secciones grandes y pequeñas alternadas ocasionalmente, con desplazamiento lateral del flujo		0.005
	Alternadas con frecuencia	Secciones grandes y pequeñas alternadas con frecuencia, con desplazamiento lateral frecuente del flujo		0.010 - 0.015
Efecto de obstrucciones	Despreciable	(a) La medida en que las obstrucciones ocupan o reducen el área de flujo, (b) El carácter de las obstrucciones (bordes agudos u objetos angulares, los cuales inducen una mayor turbulencia que los objetos de superficie curva o lisa), y (c) El lugar y espaciamiento de las obstrucciones, transversales y longitudinales, a lo largo del canal	n_3	0.000
	Menor			0.010 - 0.015
	Apreciable			0.015 - 0.030
	Mayor			0.030 - 0.060
Efecto de la vegetación	Bajo	Césped o maleza, en la cual la profundidad de flujo es de 2 a 3 veces la altura de la vegetación	n_4	0.005 - 0.010

Condiciones de cauce			Valores	
	Medio	Césped o maleza, en la cual la profundidad del flujo es de 1 a 2 veces la altura de la vegetación		0.010 - 0.025
	Alto	Césped o maleza, en la cual la profundidad de flujo es casi igual a la altura de la vegetación		0.025 - 0.050
	Muy alto	Césped o maleza, en la cual la profundidad del flujo es menos de la mitad (1/2) de la altura de la vegetación		0.050 - 0.100
Sinuosidad del canal	Baja	Sinuosidad menor a 1.2	m	1.00
	Media	Sinuosidad entre 1.2 y 1.5		1.15
	Alta	Sinuosidad mayor a 1.5		1.30

Fuente: (Chow, V. 1959)

Existe en la bibliografía ecuaciones matemáticas para la estimación del coeficiente de rugosidad, el cual está en función del diámetro característico en el cada autor difiere. Meyer-Peter y Muller (1948) propone el D90 para fondos no uniformes, mientras que Einstein (1950) usa el D65; al tratarse de valores elevados a la potencia de 1/6, no representan un error grande (Marcacuzco, J. 2017).

La ecuación de Strickler se basa en análisis de varios ríos en suiza en el año de 1923, utilizado para material pedregoso, donde el coeficiente se expresa como:

$$n = \frac{(D_{50})^{1/6}}{21} \quad (14)$$

Para material de fondo no uniforme se propone la ecuación de Meyer – Peter y Muller (1948).

$$n' = 0.038 * (D_{90})^{1/6} \quad (15)$$

Ecuación de Lane y Carlson (1953)

$$n' = \frac{(D_{75})^{1/6}}{39} \quad (16)$$

Ecuación de Bray (1979)

$$n' = 0.0495 * (D_{50})^{0.16} \quad (17)$$

Ecuación de Garden&Raju, Subramanya (1982)

$$n' = 0.047 * (D_{50})^{1/6} \quad (18)$$

2.2.7. Inicio de movimiento

El movimiento de las partículas sedimentarias se produce cuando las fuerzas generadas por el paso del flujo superan las fuerzas de resistencia que las mantienen en reposo. Este fenómeno, conocido como movimiento incipiente, se inicia cuando los momentos hidrodinámicos ejercidos por el flujo de agua alcanzan un equilibrio o superan los momentos de resistencia internos de las partículas. En este proceso, las partículas de limo y arcilla resisten principalmente por cohesión, mientras que las de arena y grava lo hacen por su peso específico (Julien, P.2010; Marcacuzco, J. 2017).

La condición crítica para el inicio del movimiento está determinada por variables hidráulicas como la velocidad del flujo y el esfuerzo cortante en el fondo del cauce. Este esfuerzo debe superar un umbral que depende directamente del tipo de sedimento y de la pendiente del cauce. El desplazamiento de las partículas ocurre solo cuando las fuerzas impulsoras, generadas por el flujo, superan a las fuerzas resistentes del sistema sedimentario (Apaclla, N. 2014; Basile, P. 2018).

2.2.7.1 Fuerza Tractiva

También conocido como esfuerzo de corte (τ_o), se refiere al esfuerzo medio que se aplica en el fondo de un canal. Es el producto del peso específico del fluido, el radio hidráulico y la inclinación del canal (Ramirez, R. 2021).

$$\tau_o = \gamma R_h S \quad (19)$$

τ_o : Tensión en el fondo (Kgf.m-3)

R: Radio hidráulico (m)

S: Pendiente media de la cuenca.

γ : Peso específico del agua (Kgf.m-3)

2.2.7.2 Parámetro de Shields

El parámetro de Shields o esfuerzo cortante crítico adimensional se usa para determinar el inicio del movimiento de partículas en un flujo para un tamaño de grano de interés considerando las fuerzas que actúan y el principio de similitud (Basile, P. 2018), el parámetro de Shields en función de τ_o :

$$\tau_c^* = \frac{(\tau_o)_c}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{RS}{\Delta d} = 0.047(\gamma_s - \gamma)d \quad (20)$$

τ_c^* : Fuerza tractiva crítica sobre el fondo en el momento de la iniciación del movimiento

$(\tau_o)_c$: Esfuerzo cortante crítico

γ_s : Esfuerzo cortante crítico

γ : peso específico del agua

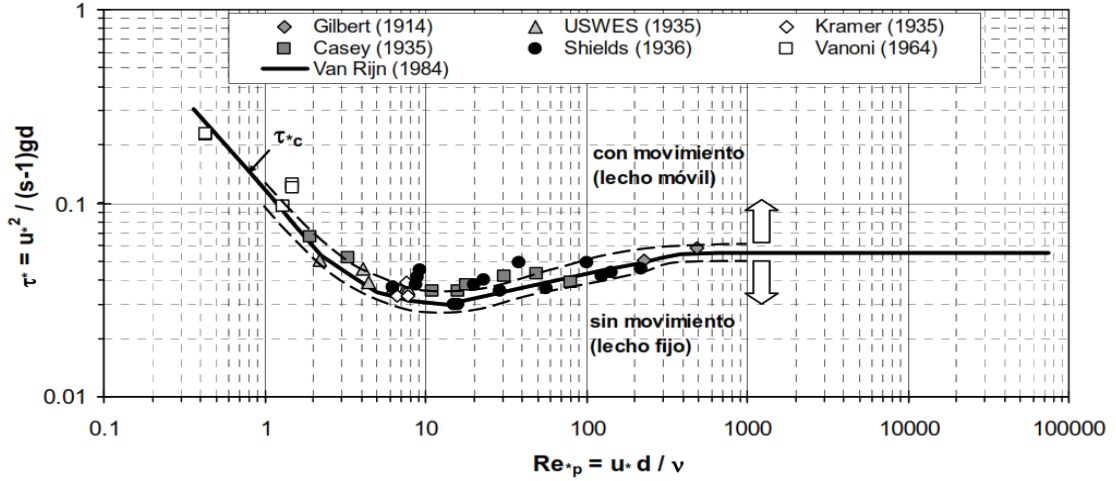
d : diámetro característico

Δ :Densidad relativa de la partícula.

R : Radio Hidráulico (m)

S = Pendiente de fondo del canal.

Figura 7: Diagrama de Shields original en el sistema de ejes



Fuente: (Basile, P. 2018)

La figura 7 muestra el diagrama de Shields en el cual se identifica diferentes zonas en función del número de Reynolds adimensional (Re^*), considerando el tamaño de las partículas y la viscosidad del fluido (Pacheco, E. & Carrillo, V. 2014).

$$R_* = \frac{U_{*c}d}{u} \quad (21)$$

Re = número de Reynolds, adimensional

V = Velocidad de corte, m/s

d = Diámetro de partícula, m

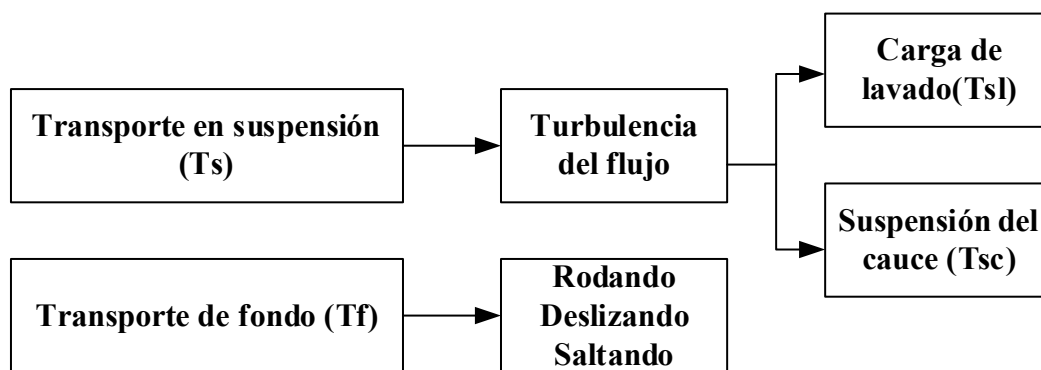
u = Viscosidad Cinemática del agua, m^2/s

2.2.8. Transporte de sedimentos

La cantidad de sedimentos que puede ser transportada por un cauce depende de su capacidad de transporte, la cual está determinada por las condiciones hidráulicas del flujo, especialmente la pendiente del terreno y el caudal disponible. Cuando la energía del flujo no es suficiente para mantener las partículas en suspensión o en movimiento, estas tienden a depositarse en el lecho del cauce, generando procesos de sedimentación (Huang, C. et al. 1999; Lei, T. et al. 2001; Qu, L. et al. 2023).

En una cuenca, los sedimentos se originan tanto del suelo como de la roca, y son movilizados por efecto de la escorrentía superficial. El volumen de material transportado por un río está directamente relacionado con las características de las fuentes de sedimento y con los mecanismos mediante los cuales ocurre dicho transporte. Esta dinámica se expresa mediante el concepto de gasto sólido total, el cual representa la suma del sedimento transportado en fondo y en suspensión (Alvarez, J. 1996; Apaclla, N. 2014).

Figura 8: Procesos de transporte de sedimentos.



Fuente: (Julien, P. 2010)

La figura 8 ilustra los procesos mediante los cuales los sedimentos son transportados en un cauce fluvial. Estos se clasifican en carga de fondo y carga en suspensión, siendo esta última subdividida en carga de lavado y suspensión del cauce.

Los procesos de erosión y depósito, vinculados con el gasto sólido total generado por la acción de la corriente, pueden manifestarse como arrastre de fondo, en suspensión o como carga de lavado (Julien, P. 2010).

$$T = T_f + T_s \quad (22)$$

El gasto sólido es la cantidad de partículas presentes en un tiempo establecido, la determinación del gasto sólido está estrechamente relacionada con las características de la cuenca, debido a su erosionabilidad y producción de sedimentos (Rocha, A. 1998).

Gasto sólido de fondo

El gasto sólido de fondo describe el flujo de sedimentos que se desplaza a lo largo del lecho del cauce mediante procesos como el rodamiento, el deslizamiento y el salto. Este tipo de transporte involucra principalmente partículas gruesas, como arena, grava y bolones, que se mantienen en contacto intermitente con el fondo. El movimiento ocurre dentro de la capa inferior del flujo, denominada capa del fondo, donde también puede generarse transporte en suspensión cercana al lecho (Alvarez, J. & Flores, M. 1996; Apaclla, N. 2014).

Este tipo de gasto puede cuantificarse en unidades de masa (M), masa por unidad de tiempo y longitud (M/LT), o volumen por unidad de tiempo y ancho (L^2/T). Cada cauce presenta un gasto sólido de fondo característico, con un límite natural en la cantidad de sedimentos que puede movilizar. En ríos de montaña con pendientes pronunciadas, este componente puede representar hasta el 50 % del transporte total de sedimentos (Aguirre-Pe, J. et al. 2000; Alvarez, J. & Flores, M. 1996; Julien, P. 2010; Rocha, A. 1998).

Gasto sólido en suspensión

El gasto sólido en suspensión representa la cantidad de sedimentos finos transportados por el flujo en suspensión, y suele expresarse en función del gasto líquido. Esta relación puede establecerse para distintos intervalos temporales, como diarios, mensuales o anuales (Rocha, A. 1998).

Las partículas de menor tamaño, una vez desprendidas del fondo del cauce o erosionadas desde los taludes por acción del agua en movimiento, pueden mantenerse en suspensión durante largos periodos. Este tipo de transporte es favorecido por la velocidad y la turbulencia del flujo, las cuales generan un intercambio constante de partículas entre el fondo y la columna de agua.

Los sedimentos en suspensión tienden a depositarse únicamente cuando la velocidad del flujo disminuye, el perfil del cauce se suaviza, o la corriente desemboca en zonas de menor energía, como pozas o cuerpos de agua estancada. Esta dinámica es clave para comprender el comportamiento sedimentológico de ríos con alta carga de partículas finas (Hudson, N. 1997; Leliavsky, S. 1955).

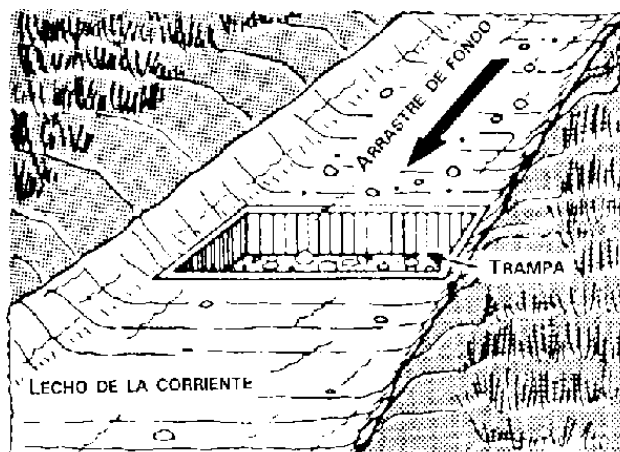
2.2.9. Metodologías de medición

2.2.9.1 Métodos de Medición del Sedimento de fondo o carga de fondo

- **Uso de Trampas:**

Los sedimentos del fondo se mueven saltando o tocando el fondo. En estudios realizados en Cajamarca, el método más utilizado para medir la carga de fondo fue el uso de trampas.

Figura 9: Trampa de arrastre de fondo



Fuente: (Hudson, N. 1997)

En la figura 9 se muestra imagen referencial de la trampa de sedimentos el cual es un método directo. Consiste en realizar una excavación a lo largo de una sección transversal del río, donde los sedimentos se depositan por acción de la corriente. El área aguas arriba de un vertedero puede funcionar como una trampa de sedimentos; sin embargo, en ríos con alta carga, este proceso puede llevar muy costoso (Hudson, N. 1997).

- **Aplicación de la fotogrametría:**

La fotogrametría se utiliza actualmente de manera generalizada para estudiar distintos procesos y formas del terreno en la superficie terrestre, y está convirtiéndose rápidamente en una herramienta clave en la geomorfología fluvial.

La fotogrametría tiene como objetivo determinar con exactitud la forma, el tamaño y la ubicación espacial de un objeto, a partir de mediciones obtenidas mediante una o varias fotografías. Aunque la fotogrametría no interpreta directamente los fenómenos naturales, permite generar planos, ortofotos y modelos digitales de elevación que facilitan el análisis geomorfológico (Sajinkumar, K. 2018).

En esta investigación, se empleó fotogrametría a partir de imágenes captadas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV), lo que permitió generar Modelos Digitales de Elevación Diferencial (DoD, por sus siglas en inglés). Estos modelos facilitaron la identificación de cambios en la superficie del cauce en distintos momentos y la estimación de volúmenes de sedimentos movilizados. Esta técnica ha sido aplicada con éxito en numerosos estudios fluviales, en los cuales se han realizado levantamientos topográficos repetidos para analizar patrones de erosión, deposición y variaciones morfológicas (Cândido, B. et al. 2020; Lane, S. 2003).

2.2.9.2 Métodos de Medición del Sedimento en suspensión

La medición de las concentraciones es la forma más fácil y posiblemente la única de calcular el gasto de sólido en suspensión. Durante la mayor parte del año, los ríos de la costa peruana y los interandinos carecen de transporte sólido, siendo la mejor opción centrarse en la temporada de lluvias (Rocha, A. 1998).

Los sedimentos en suspensión pueden medirse de diferentes maneras dependiendo del transporte de sedimentos durante el año. El método más adecuado en condiciones normales es el uso de muestreadores, que se dividen en integradores y muestreadores puntuales (Lopez, R. 1969).

- **Muestreo puntual**

La colecta de muestras en un punto específico del cauce se realiza a profundidades y distancias determinadas, utilizando una botella de boca ancha que se lanza en el centro del río. Entre sus ventajas destacan la mayor seguridad en su manipulación y la simplicidad logística requerida para su implementación (Lopez, R. 1969).

- **Muestreo por integración**

El muestreo por integración consiste en bajar y elevar un muestreador a lo largo de una vertical del cauce a velocidad constante, permitiendo así la acumulación progresiva de agua y sedimentos en su interior. Este tipo de muestreador tiene en cuenta la variación de la velocidad de flujo con la profundidad, lo que permite obtener una muestra más representativa del perfil vertical de la corriente. Generalmente, el equipo utilizado está compuesto por una botella de vidrio protegida por una armadura metálica, suspendida mediante una varilla. Sin

embargo, su aplicación requiere una mayor logística en comparación con métodos más simples (Julien, P.2010)..

2.2.9.3 Métodos de Medición de Caudales

El caudal de un río es el volumen de agua que pasa por una sección de un canal en un período de tiempo, para poder medirlos depende los datos geométricos de la sección transversal (m^2) y la velocidad (m/s) (Hudson, N. 1997; Morales, F. & Duarte, J. 2012).

Existen diversos métodos para la medición de caudales, los cuales varían en función de las condiciones del cauce, los recursos disponibles y el grado de precisión requerido.

- **Método volumétrico**

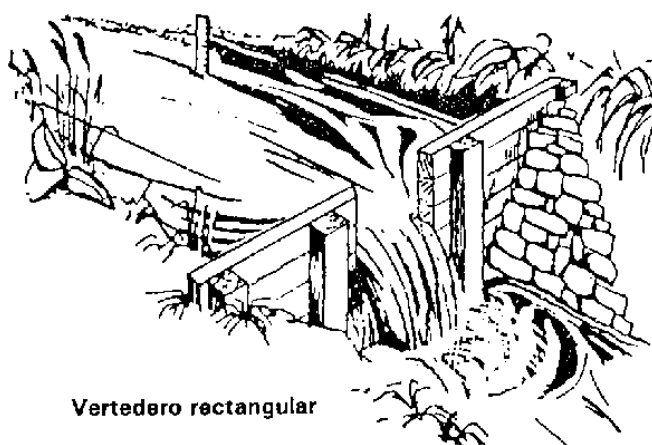
Es medir directamente el tiempo necesario para llenar un recipiente de volumen conocido. Utilizado en cauces pequeños, el cual consiste en realizar 5 mediciones del tiempo en llenarse el recipiente para obtener un valor promedio (Juan, E. et al. 2014).

$$Q(l/s) = \text{volumen}/\text{tiempo} \quad (23)$$

- **Vertederos de aforo**

La medición de los flujos de agua en cauces naturales puede ser inexacta porque los canales suelen ser irregulares y, por lo tanto, la relación entre el agua y el nivel no es uniforme, para evitar este problema se puede instalar un vertedero (Hudson, N. 1997).

Figura 10: Vertedero rectangular



Fuente: (Hudson, N. 1997)

El vertedero es un muro con una dimensión geométrica fija que se opone al flujo de agua y contra la cual se mide el flujo (Morales, F. & Duarte, J. 2012).

Debido a que el uso de los vertederos suele ser simple, económico y fácil de instalar, el resultado de la medición de los caudales es efectivo (Menchú, S. 2016).

La fórmula general de descarga de un vertedero rectangular.

$$Q = C_d(L - 0.01nh) * h^{3/2} \quad (24)$$

Q = es el caudal, en m³ /s

L= es la anchura (m) de la escotadura

C_d=es los coeficientes teóricos de descarga

h =es la altura de agua en la escotadura

n=número de contracciones (0,1 ó 2)

La calibración del coeficiente de descarga para los caudales bajos, se utiliza el método volumétrico por la alta precisión que tiene. El uso de este método es especialmente conveniente porque es de bajo coste, fácil de aplicar, tiene un bajo impacto y una alta precisión (Gualpa, M. et al. 2022).

- **Método de flotadores**

Este método es el más conveniente, pero proporciona solo una estimación del flujo. Este método se basa en el hecho de que la velocidad de movimiento de un objeto flotante es la misma de las líneas de la corriente. El uso de método es conveniente cuando no se tenga una estación, en crecidas de río y cuando exista peligro de ingresar al cauce del río (Chamorro, G. 2011).

Se debe estimar la velocidad del agua y el área del canal

$$Q = A * V \quad (25)$$

Q = es el caudal, en m³ /s

A = área de la sección, expresada en metros cuadrados (m²).

V=velocidad media del agua, expresado en metros sobre segundos (m/s).

- **limnímetro**

La cota limnimétrica de una sección se utiliza para medir el nivel de agua. Estas lecturas de cota se transformarán en caudales a través de una curva de calibración (relación entre nivel de agua y el caudal medido en un tiempo determinado).

- **Método área – pendiente**

La estimación indirecta del caudal en ríos es la ecuación de Manning, cuya aplicación requiere conocer el área de intersección, el radio hidráulico, la rugosidad y la pendiente hidráulica de una parte aguas arriba y aguas abajo del río. Este método se puede utilizar para medir inundaciones (Arboleda, J. et al. 2018).

$$Q = \frac{1}{n} + A^{2/3} S^{1/2} \quad (26)$$

Q: Caudal A: área de sección transversal del río

R: radio hidráulico (A/P), siendo

P. perímetro mojado de la sección

S: pendiente hidráulica

N: coeficiente de rugosidad de Manning

2.2.10. Métodos de Cuantificación del transporte de sedimentos

No existe una ecuación única que describa la mecánica del transporte de sedimentos que represente la relación de agua y sólidos, a lo largo de los años se han alcanzado diversas ecuaciones empíricas o semiempíricas en base de distintas teorías u observaciones. El mejor caso es tener una combinación de ambos métodos. Todos los modelos son más o menos fiables porque sus aplicaciones se limitan a las situaciones para las que fueron creados (Rocha, A. 1998).

Para la deducción de las diferentes ecuaciones se basaron en diferentes enfoques: el método de Yang (1973) obtenido a partir de la regresión, el método de Einstein (1950) basado en enfoque probabilístico, y el método Meyer Peter & Muller (1948) basado en un enfoque determinista y otros (Barbosa, S. 2013).

Las ecuaciones empíricas de tipo Schoklitsch basadas en la función de flujo crítico dan buenos resultados para cuencas fluviales de montaña y de fuerte pendiente, como las de Mizuyama y Shimohigashi (1985) y Aguirre-Pe et al.(2000) (Marín, M. 2008).

Tabla 5. Ecuaciones de transporte de sedimentos y rango de tamaños

Ecuación	ds (mm)	Ecuación	ds (mm)
Du Boys (1879)	N/D	Mizuyama (1977)	N/D
Schoklitsch (1930, 1959)	0.30 - 5.00	Brownlie (1981)	0.15 - 1.71

Ecuación	ds (mm)	Ecuación	ds (mm)
Shields (1936)	N/D	Simons et al. (1983)	N/D
Kalinske (1947)	N/D	Yang (1984)	2.46 - 10.00
Einstein (1942, 1950)	N/D	Van Rijn (1984)	N/D
Meyer-Peter & Müller (1948)	0.40 - 30.00	Smart (1984)	N/D
Einstein Brown (1952)	N/D	Bettes (1984)	N/D
Einstein Modificado (1955)	0.283	Bathurst (1985)	N/D
Chien (1956)	0.4 - 30.00	Heng Seng Low (1989)	N/D
Bagnold (1956, 1966, 1980)	1.15 - 1.71	Laursen & Copeland (1990)	0.011 - 29
Laursen (1958)	0.08 - 0.70	Karim & Kennedy (1990)	0.06 - 2.00
Rottner (1959)	N/D	Parker (1990)	54
Yalin (1963)	N/D	Andrews (1994)	N/D
Colby (1964)	0.10 - 0.80	Posada (1994)	N/D
Graf (1968)	N/D	Posada Nordin (1994)	0.04 - 1.13
Toffaletti (1969)	0.062 - 4.00	Colby Modificado (1994)	N/D
Engelund y Hansen (1972)	0.19 - 0.93	Yang, Molinas & Wu (1994)	0.013 - 0.09
Shen & Hung (1972)	0.35	Molinas & Wu (1996)	0.09 - 1.15
Ackers & White (1973)	0.04 - 7.00	Wu, Wang & Jia (2000)	0.30 - 30
Yang (1973)	0.15 - 1.71	Wilcock & Crowe (2003)	> 2.00

Fuente: (Barbosa, S. 2013)

2.2.10.1 Estimación del Gasto sólido en suspensión

La curva de gasto de sedimentos establece una relación entre el caudal líquido y la descarga de sedimentos en suspensión. La pendiente de esta curva representa la concentración de sedimentos suspendidos y varía en función del caudal: es más pronunciada a bajas velocidades y más plana a caudales elevados (Ponce, V. 1988).

La siguiente función usada para relacionar el caudal sólido y líquido es:

$$Q_s = cQ_m \quad (27)$$

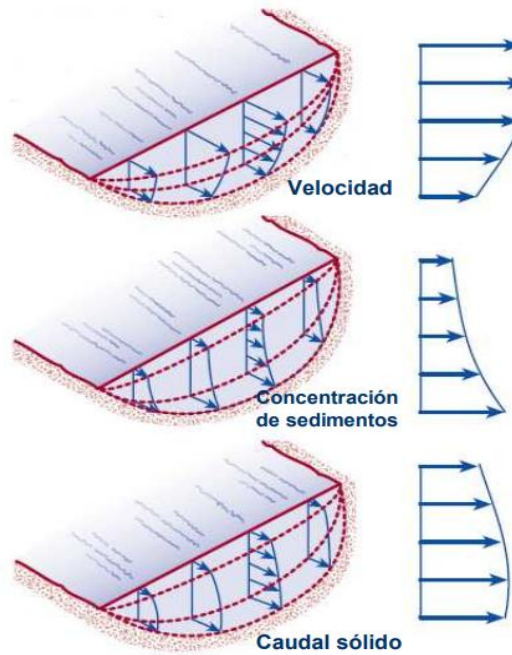
Q_s = descarga de sedimentos suspendidos

Q = caudal líquido,

c y m , coeficiente y exponente de la curva de gasto

Cuando el valor de $m=1$ se acercan a arroyos que presentan caudales de inundación altos (Ponce, V. 1988).

Figura 11: Distribución de la velocidad, la concentración de sedimentos y el caudal sólido.



Fuente: (Bathurst, J. 2000)

Concentración de Sedimentos

La concentración de sedimentos se define como la relación entre el volumen de sedimento presente (V_s) y el volumen total del fluido que lo contiene. Esta se determina mediante procedimientos de laboratorio que consisten en filtrar el agua, secar los sólidos recolectados y pesar el residuo seco, utilizando un volumen conocido de muestra. Esta concentración, junto con el caudal, permite calcular la tasa de descarga de sedimentos (Hudson, N. 1997).

La unidad más comúnmente utilizada para expresar la concentración es el miligramo por litro (mg/L), aunque esta puede variar según las normas o prácticas de cada país (Julien, P. 2010)

$$c_s = \frac{\text{Volumen de sedimentos}}{\text{volumen total}} \quad (28)$$

Para determinar los sólidos suspendidos en el laboratorio se calcula el peso de los sólidos en la muestra obtenida, mezcla de agua y sedimento. Esto se logra utilizando un filtro con un tamaño de poro específico para separar los sólidos del agua. Este método se utiliza para determinar la cantidad de sólidos en peso presentes en una determinada cantidad volumétrica de muestra de agua.

$$c_{s(mg/L)} = \frac{PESO_{final}(g) - Peso_{inicial}(g)}{Volumen\ de\ muestra(ml)} \times 10^6 \quad (29)$$

El MINAM mediante los estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua presenta los valores máximos respecto a ecosistemas frágiles, reservas naturales y aguas superficiales que requieren ser protegidas.

Tabla 6. Parámetros para concentración máxima de sólidos totales

Parámetro	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos Costa y sierra	E2: Ríos Selva	E3: Ecosistemas costeros y marinos	
					Estuarios	Marinos
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	≤ 25	≤ 100	≤ 400	≤ 100	≤ 30

Fuente: (MINAM 2017)

Clasificación de flujo en función de la concentración de sedimentos

En la literatura distintos autores clasifican el flujo en función de la concentración de sedimentos diferenciándose en el porcentaje de sólidos en flujo.

Tabla 7. Comportamiento del Flujo en Función de la Concentración de Sedimentos

Descripción del Tipo de Flujo	Concentración de sedimentos (Cv)		Características del Flujo
	En Volumen	En Peso	
Deslizamientos	0.65 – 0.80	0.83 – 0.91	No hay flujo; falla por deslizamiento de bloques
	0.55 – 0.65	0.76 – 0.83	Deslizamiento de bloques; falla con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento lento antes de la falla.
Flujos de lodo (Mudflow)	0.48 – 0.55	0.72 – 0.76	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido de flujo de lodo; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande sobre una superficie nivelada.
	0.45 – 0.48	0.69 – 0.72	El flujo se extiende sobre una superficie nivelada; flujo cohesivo; algo de mezcla.
	0.40 – 0.45	0.65 – 0.69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra propiedades fluidas en la deformación; se extiende sobre la superficie

Descripción del Tipo de Flujo	Concentración de sedimentos (Cv)		Características del Flujo
	En Volumen	En Peso	
Avenida de lodo (Mud Flood)			horizontal, pero mantiene una superficie fluida inclinada; sedimentación de partículas grandes (rocas); aparecen ondas, pero se disipan rápidamente.
	0.35 – 0.40	0.59 – 0.65	Sedimentación marcada de gravas y cantos rodados; expansión casi completa sobre la superficie horizontal; superficie líquida con dos fases del fluido; las olas viajan sobre la superficie.
	0.30 – 0.35	0.54 – 0.59	Separación del agua en la superficie; las olas viajan fácilmente; la mayoría de la arena y la grava se han sedimentado y se mueven como carga de fondo.
	0.20 – 0.30	0.41 – 0.54	Acción de olas distintiva; superficie líquida; todas las partículas descansan en el fondo en condiciones de flujo estable.
Inundación de agua	< 0.20	< 0.41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y carga de fondo.

Fuente: (O'Brien, J. 2003)

2.2.10.2 Estimación del Gasto sólido de fondo

a. Meyer-Peter y Müller (1948)

La fórmula de Meyer-Peter y Müller (1948) fue desarrollada para estimar la carga de sedimentos de fondo en cauces con material grueso. Se basa en el tamaño medio del sedimento (d_{50}) presente en la capa superficial del lecho. Esta ecuación es ampliamente utilizada para el transporte de gravas en condiciones donde también puede haber presencia de carga en suspensión. Su fundamento radica en la diferencia entre el esfuerzo cortante total y el esfuerzo cortante crítico necesario para iniciar el movimiento de las partículas (Apaella, N. 2014; Julien, P. 2010).

Meyer-Peter y Müller durante el desarrollo de la formula utilizo el siguiente rango de valores:

Pendiente: 0.4 a 2%

Gasto: 0.002 a 2 m³/s

Tirante: 0.01 a 1.2 m

Diámetro: 0.4 a 30 mm

Peso específico: 1.2 a 4.22 tn/m³

$$g_B = 8\gamma_s \left(g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right) D^3 \right)^{0.5} \left[\frac{n_s^{1.5}}{n} \tau_* - 0.047 \right]^{1.5} \quad (30)$$

El n_s , se obtiene por la fórmula de strickler del D_{90} de la partícula

$$n_s = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (31)$$

g_B =gasto sólido de fondo unitario, Kgf/s.m

D =diámetro de la partícula, m

g =aceleración debido a la gravedad m/s

γ = peso específico del agua, Kgf/m³

γ_s =peso específico del suelo, Kgf/m³

τ_* =número adimensional de shields

n =coeficiente de Manning

n_s =coeficiente de Manning debido a la partícula

b. Fórmula de Schoklitsch (1962)

La fórmula de Schoklitsch fue desarrollada para estimar el transporte de sedimentos en cauces con fondo de grava. Su planteamiento se basa en datos empíricos obtenidos a partir de caudales aforados en canales experimentales y observaciones de campo. Esta formulación considera que la cantidad de sedimentos transportados es una función constante del caudal, bajo el supuesto de que el suministro de sedimentos está siempre disponible en cauces naturales (Bravo-Espinosa, M. et al. 2004).

$$g_B = 2500S^{\frac{1}{3}} \left(qS^{\frac{7}{6}} - 19.05\tau_{*c}^{5/3} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right)^{\frac{5}{3}} D_{40}^{\frac{3}{2}} \right) \quad (32)$$

g_B =gasto sólido total unitario, Kgf/s.m

D =diámetro de la partícula (d_{40}), m

γ = peso específico del agua, Kgf/m³

γ_s =peso específico del suelo, Kgf/m³

S =pendiente media de la cuenca

τ_{*c} =número adimensional de shields, se obtiene de la relación propuesta por maza.

q = gasto unitario líquido, m³/s.m

Schoklitsch propone dos expresiones para obtener el d_c , si $D \geq 0.006$ m se considera:

$$d_c = 0.076 \frac{\Delta D}{S} \quad (33)$$

Entonces se obtiene:

$$g_B = 2500S^{\frac{1}{3}} \left(qS^{\frac{7}{6}} - 0.26 \Delta^{\frac{5}{3}} D_{40}^{\frac{3}{2}} \right) \quad (34)$$

Si el $0.0001 \leq D \leq 0.003\text{m}$ el d_c se obtiene

$$d_c = 0.000285 \frac{\Delta D^{1/3}}{S} \quad (35)$$

Entonces se obtiene:

$$g_B = 2500 S^{1/3} \left(qS^{\frac{7}{6}} - 2.351 \cdot 10^{-5} \Delta^{5/3} D_{40}^{\frac{7}{18}} \right) \quad (36)$$

c. Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (1982)

Este modelo determina el valor óptimo de las tasas de transporte y predice condiciones de cuasi equilibrio para el arrastre de fondo en ríos de grava. La fórmula procede de los datos del río Oak Creek con un ancho de 3.65, donde se encontró que todos los tamaños se movían equitativamente cuando se alcanza la condición crítica que rompía la coraza; es decir, la fórmula aplicable si $0.95 > \phi_{50}$ (García, C. & Sala, M. 1998).

$$g_B = 1400 \left(\frac{Wg^{1/2}(dS)^{3/2}}{2.65} \right) \quad (37)$$

Donde:

g_B = Gasto sólido de fondo total, kg/s·m.

g = Aceleración de la gravedad, m/s

d = tirante medio de la sección, m.

S =pendiente del fondo del cauce, m/m.

$$\phi_{50} = \frac{\tau_{50}^*}{0.0876} \quad (38)$$

$$\tau_{50}^* = \frac{0.606R_h S}{D_{50SUB}} \quad (39)$$

Donde:

ϕ_{50} =Esfuerzo hidráulico normalizado

τ_{50}^* =Esfuerzo hidráulico adimensional

R_h = Radio hidráulico de la sección, en m.

D_{50} = Diámetro del 50 % de los sedimentos, en m.

Para $0.95 < \phi_{50} < 1.65$

$$W^* = 0.025e^{[14.2(\phi_{50}-1)-9.28(\phi_{50}-1)^2]} \quad (40)$$

Para $\phi_{50} > 1.65$

$$W^* = 11.2 \left(1 - \frac{0.0822}{\phi_{50}}\right)^{4.5} \quad (41)$$

d. Mizuyama y Shimohigashi (1985)

La ecuación se basó en sistemas fluviales con pendientes pronunciadas y condiciones de alta energía sin alta concentración de sedimentos finos (López, R. 2003).

$$g_B = 20 \frac{S^2}{\Delta^2} \frac{q}{\sqrt{g\Delta D_{50}^3}} \quad (42)$$

Donde:

g_B = Gasto sólido de fondo total, kg/s·m.

S = pendiente del fondo del cauce, en m/m.

q = caudal líquido por unidad de ancho, en m³/s.m.

g = Aceleración de la gravedad, m/s².

D_{50} = Diámetro del 50 % de los sedimentos, en m.

Δ = Densidad relativa de la partícula.

e. Método de Mora, Aguirre Y Fuentes (1990)

Desarrollado para cauces con alta pendiente en flujos macro rugosos donde se cumpla que el parámetro adimensional $\frac{d}{D_{50}} < 10$. El principio de este método es que el inicio del movimiento está más influenciado por las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre el material que por la tensión tangencial promedio del flujo de fondo (Alvarez, J. & Flores, M. 1996).

La expresión empírica para el transporte total del fondo (g_B) es:

$$g_B = 0.0072 \cdot \gamma_s \cdot S \cdot C_a \cdot D_{50} \cdot U_0 \cdot (F^2 - F_e^2)^{0.5} \quad (43)$$

o

$$g_B = \frac{0.0072 \cdot \gamma_s \cdot SU}{U_o} \cdot (g \cdot \Delta \cdot D_{50}^3)^{0.5} \cdot (F^2 - F_c^2)^{1.5} \cdot [\cos \alpha (\tan(\emptyset) - \tan(\alpha))]^{0.5} \quad (44)$$

donde:

- q_{BT} es el transporte total del fondo, kg/s.m.
- γ_s es el peso específico del sedimento.
- D_{50} es el diámetro de las partículas en el cual el 50% es menor que este tamaño (m).
- U_o es la velocidad de referencia.
- F es el número de Froude densimétrico.
- F_c es el número de Froude densimétrico crítico.

La ecuación para la velocidad de referencia (U_o) es:

$$U_o = (g \cdot 6 \cdot D_{50} \cdot \cos(\alpha) \cdot (\tan(\emptyset) - \tan(\alpha)))^{0.5} \quad (45)$$

donde:

- g es la aceleración gravitacional.
- Δ es la densidad relativa de las partículas sumergidas.
- α es el ángulo que forma la pendiente del fondo con la horizontal.

$$\alpha = \tan^{-1}(\theta) \quad (46)$$

- θ ángulo inclinación longitudinal de lecho
- $\emptyset$ es el ángulo de fricción interna de las partículas. (ver Figura 12)

El coeficiente adimensional de Chezy (C_a) se obtiene de:

$$C_a = \frac{U_o}{\sqrt{g \cdot S \cdot R}} = \frac{U_o}{U_*} \quad (47)$$

donde:

- S es la pendiente longitudinal del fondo.
- R es el radio hidráulico.

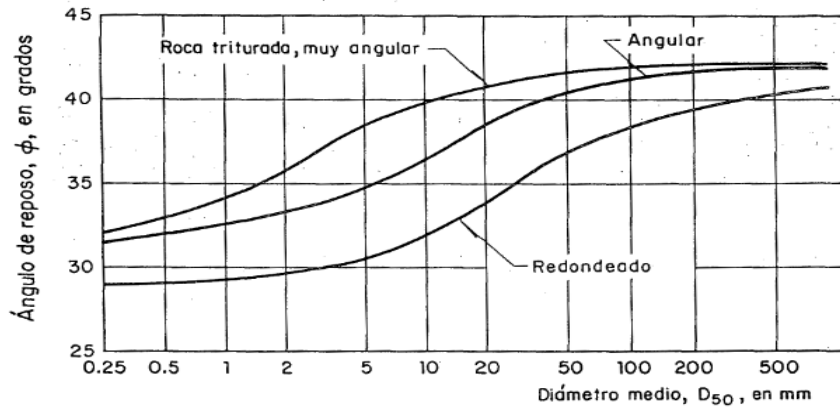
El número de Froude densimétrico (F) se calcula como:

$$F = \frac{U}{\sqrt{g \cdot 6 \cdot D_{50}}} \quad (48)$$

Y el número de Froude densimétrico crítico (F_c) se define por:

$$F_e = 1.31 + 0.66 \cdot \left(\frac{d}{D_{50}} \right)^{0.6} \quad (49)$$

Figura 12:Ángulo de reposo en función del diámetro y redondez de las partículas



Fuente: (Alvarez, J. & Flores, M. 1996)

$$G_B = g_B \cdot b \quad (50)$$

- G_B Gasto sólido de fondo que pasa por la sección completa de un cauce en kg/s
- b ancho del fondo del cauce

2.2.11. Volumen de sedimentos

El sedimento transportando que llegara a acumular ese denominado volumen real V_x se expresa mediante la relación (Alvarez, J. & Flores, M. 1996):

$$V_x = \frac{q_x b \Delta t}{(1 - n)} = \frac{Q_x \Delta t}{(1 - n)} \quad (51)$$

donde:

- q_x Es el transporte unitario de sedimentos ($m^3/s.m$)
- Q_x Transporte de sedimentos que atraviesa toda la sección de un cauce (m^3/s)
- Δt intervalo de tiempo
- n Porosidad del material depositado
- b ancho en el fondo del cauce
- V_x volumen real de sedimentos que pasan por una sección en un lapso de tiempo (Δt), una vez depositados.

Donde

La porosidad (n) se define como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total del depósito, es decir, la suma del volumen de vacíos y de sólidos. En sedimentos no consolidados y saturados, este valor suele variar entre 0.35 y 0.45, dependiendo de factores como la granulometría y el grado de compactación (Rocha, A. 2018).

Se ha propuesto una ecuación empírica que permite estimar la porosidad en función del diámetro medio del sedimento D_{50} , expresado en milímetros. Esta fórmula tiene ciertas limitaciones, ya que fue desarrollada bajo condiciones controladas y su aplicación es válida solo cuando se cumplen sus limitaciones (Komura, S. 1961).

$$n = 0.245 + 0.14 D_{50}^{-0.21} \quad (52)$$

Siendo válido para $4 \times 10^{-4} \text{ mm} < D_{50} < 80 \text{ mm}$

CAPÍTULO III

III. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

La cuenca de la quebrada Calispuquio nace al sureste de la ciudad de Cajamarca, teniendo de aporte la quebrada Dos aguas a lo largo de su recorrido. Las aguas de la quebrada Calispuquio recorren desde una dirección Noroeste (NO) y Sureste (NE) a través de la ciudad de Cajamarca.

Geográficamente la cuenca de la quebrada se encuentra localizado entre las siguientes coordenadas

Longitud oeste (O) : $78^{\circ}29'33'' - 78^{\circ}32'10''$

Latitud sur (S) : $7^{\circ}9'55'' - 7^{\circ}11'54.44''$

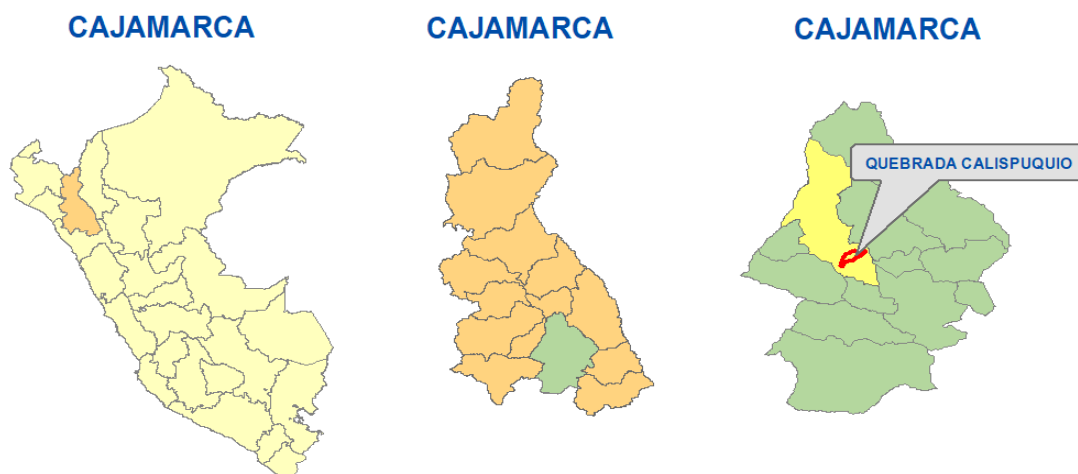
Políticamente la cuenca se encuentra en:

Departamento : Cajamarca.

Provincia : Cajamarca.

Distrito : Cajamarca.

Figura 13: Ubicación política de la zona de estudio



3.1.1. Tramo de estudio

El tramo de estudio comprende una longitud aproximada de 400 metros en el cauce de la quebrada, aguas arriba su canalización en el Jr. Nicolas Arriola.

Figura 14: Ubicación satelital del tramo de estudio.



Dentro de este tramo, se distinguen dos sectores morfológicamente diferenciados:

- Sección no canalizada (260 m): corresponde a un cauce natural con lecho conformado por materiales no cohesivos como gravas y arenas. En este sector, los márgenes presentan alta inestabilidad estructural y se han identificado evidencias de erosión lateral activa, asociada a lluvias intensas y a la falta de protección ribereña.
- Sección canalizada (140 m): revestida con elementos de concreto, actualmente presenta signos de colmatación por acumulación de sedimentos y obstrucción parcial por residuos sólidos, lo que reduce su capacidad hidráulica y agrava el riesgo de desbordes en eventos de avenida.

Las coordenadas geográficas del tramo de estudio, en el sistema WGS 84 – Zona 17 Sur, son:

Punto de inicio: Este (X): 774507.00 m / Norte (Y): 9206706.00 m

Punto final: Este (X): 774779.33 m / Norte (Y): 9206829.25 m

3.2. Materiales, Equipos y Softwares

3.2.1. Materiales

- Vertedero, Reglas limnimétrica y cronometro.
- Botellas de 500ml y Jarra graduada
- Libreta, palana, sacos, cordel y wincha
- Gps y cámara fotográfica

3.2.2. Equipos

- Balanza mecánica y Juego de tamices granulométricos ASTM422
- Estación Total (Leica TS 02).y Dron DJI Phantom 4 Pro

3.2.3. Softwares

- Programas del paquete de Microsoft Office.
- Map Pilot
- QGis 3.36
- Civil 3D 2018
- HEC-RAS

3.3. Metodología

3.3.1. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es no experimental y de tipo longitudinal, dado que se observaron y analizaron variables sin manipulación directa, a lo largo de un periodo específico comprendido entre noviembre de 2023 y mayo de 2024.

3.3.2. Métodos de investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que busca resolver un problema específico asociado a la acumulación de sedimentos y su impacto sobre la canalización existente del cauce de la quebrada Calispuquio.

Se enmarca dentro del enfoque cuantitativo, dado que se basa en la medición numérica de variables físicas (caudales, pendientes, volúmenes, concentraciones) y en el análisis estadístico de los resultados.

Según su nivel de investigación, se clasifica como descriptivo, dado que se centra en caracterizar el comportamiento del cauce en el tramo de estudio y la dinámica de transporte de sedimentos observadas durante la temporada de lluvias.

En cuanto a técnica de recolección de datos, la investigación se desarrolló mediante actividades de campo y laboratorio. En campo, se realizaron levantamientos topográficos con dron, aforos de caudales y recolección de muestras de sedimentos. En laboratorio, se llevaron a cabo ensayos granulométricos por tamizado y la determinación de concentraciones de sedimentos en suspensión mediante el método gravimétrico.

Según el periodo temporal, se trata de una investigación longitudinal, ya que se ejecutó durante un periodo definido.

3.4. Población, muestra, unidad de análisis

- Población: La población está constituida por el caudal y sedimentos presentes en el cauce de la quebrada Calispuquio.
- Muestra: La muestra estuvo conformada por el tramo de 406 metros del cauce, en el cual se realizaron el monitoreo de caudales y la recolección de muestras de sedimentos para su análisis en laboratorio.
- Unidad de análisis: La unidad de análisis corresponde al tramo de la quebrada Calispuquio comprendido entre las progresivas 0+000 km y 0+406 km, ubicado aguas arriba del Jr. Nicolás Arriola. Este tramo presenta dos configuraciones diferenciadas: un tramo inicial descubierto, con una longitud de 247 metros, que posee un cauce natural y un ancho promedio de 2.3 metros y un segundo tramo canalizado, de 159 metros revestido con concreto.

3.5. Procedimiento

Con la finalidad de cumplir los objetivos trazados en la presente investigación, se desarrolló un conjunto de actividades que comprendieron trabajo de campo, ensayos de laboratorio y trabajo en gabinete.

3.5.1. Reconocimiento de la zona de estudio

Para establecer la forma de trabajo y la metodología adecuada, se partió por recorrer el cauce de la quebrada en el mes de octubre del 2024, centrándose el recorrido en la parte alta del barrio Santa Elena y Bella Vista, zonas con reportes de acumulación de sedimentos y residuos. Se usaron herramientas informáticas como Google Earth, que nos permitió planificar de manera más acertada, el área de estudio, que luego, fue ajustada en campo.

3.5.2. Levantamiento topográfico en el tramo de estudio

El levantamiento topográfico se realizó mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) de la marca DJI, modelo Phantom 4 Pro, Además, se empleó una estación total (Leica TS 02) para el levantamiento topográfico de seis puntos de control distribuidos en el área de estudio, constituye una herramienta para el levantamiento topográfico en cauces naturales, especialmente en zonas de difícil acceso o con topografía accidentada. En el caso de la quebrada Calispuquio, el empleo del dron permitió generar ortofotos y modelos digitales de elevación, lo que facilitó la identificación de zonas de acumulación de sedimentos, erosión y cambios en la morfología del cauce. Este resultado fue posible debido a que el tramo de estudio no presenta árboles ni vegetación alta que impidan la captura precisa de la superficie del terreno.

Se realizaron tres levantamientos topográficos en el tramo de estudio, con el objetivo de identificar los cambios en la morfología del cauce entre los meses de octubre y enero. Para ello, El sistema utilizado para generar la topografía fue la fotogrametría aérea, mediante la captura de imágenes superpuestas y su posterior procesamiento fotogramétrico. Las imágenes fueron procesadas con los softwares DJI GO 4 y Map Pilot, los cuales permitieron la configuración del dron reajustándose el tipo de vuelo y geometría (Poligonal), alturas de vuelo (70 m) y la forma del recorrido (longitudinal) de 500 metros., la planificación automatizada de los vuelos y el control de la aeronave. Este procedimiento permitió generar modelos digitales de elevación (MDE) con alta resolución y precisión espacial. Los puntos de control se utilizaron para la georreferenciación y corrección altimétrica de los modelos obtenidos con el dron, mejorando la precisión de los resultados y reduciendo los errores asociados a factores como la iluminación o el traslape de imágenes

El primer levantamiento se realizó el 28 de octubre del 2023, el segundo el 3 de diciembre del 2023 y por último el 6 de enero 2024, en horas de la mañana para obtener una buena visibilidad del cauce. El uso del dron tuvo varias ventajas como el alto grado precisión de los resultados mostrados y el tiempo para empleado fue muy reducido.

3.5.3. Puntos de Control para fotogrametría.

Los puntos de Control, fueron plasmados con pintura Sprite roja y negra, en forma de aspa aproximado de 60 centímetros en una superficie adecuada, además en la zona se existen buzones que también se han considera para los puntos de control, dichos puntos se distribuyeron de forma perimetral y central a la zona de vuelo. Es de señalar, que las coordenadas de dichos puntos fueron obtenidas antes y después de ejecutado los vuelos.

En función de las áreas de vuelo y teniendo un especial énfasis al cauce de la quebrada, se definieron 6 puntos de Control Topográfico previas a la ejecución de las misiones de vuelo. Dichos puntos de Control vienen a ser puntos en el terreno, cuyas coordenadas son obtenidas topográficamente aprovechando la topografía convencional, en este caso haciendo uso de la Estación Total, los mismos, que sirven para poder llevar un mejor control altimétrico de las imágenes satelitales y reducir al mínimo los errores por traslape de fotos, condiciones ambientales desfavorables, poca visibilidad, velocidades altas de viento, entre otros.

El área del levantamiento fue de 0.97 Hectáreas mediante la fotogrametría, se marcaron y obtuvieron las coordenadas de 06 Puntos de Control Topográfico respectivamente, los mismos que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Puntos de Control para fotogrametría.

PUNTOS DE CONTROL PARA FOTOGRAMETRÍA			
PUNTO	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN
PC-01	774,774.274	9,206,824.0553	2762.756
PC-02	774,670.1308	9,206,745.9541	2774.950
PC-03	774,557.5908	9,206,714.3617	2785.343
PC-04	774,513.9139	9,206,696.2257	2790.133
PC-05	774,582.0635	9,206,721.507	2783.592
PC-06	774,531.8477	9,206,707.2505	2789.433

3.5.4. Recolección de datos de suelos

Se realizó el muestreo de suelos en el tramo de estudio en 5 puntos a lo largo del tramo de estudio. De las muestras extraídas, se obtuvieron sus principales parámetros y las curvas granulométricas correspondientes a cada muestra.

La toma de muestras de sedimentos en suspensión se la realizó punto de aforo obtenidas durante los eventos lluvias.

3.5.5. Recolección de datos de caudales

Para la medición sistemática de los caudales en la quebrada Calispuquio, se instaló un vertedero rectangular de pared delgada en un tramo representativo del cauce, en un tramo recto para garantizar estabilidad y flujo uniforme. El propósito principal fue registrar el comportamiento del flujo durante los eventos hidrológicos ocurridos entre abril y mayo de 2024.

a) Calibración del vertedero:

Previo al inicio de los registros continuos de caudal, se calibró el vertedero rectangular de pared delgada mediante el método volumétrico. Este consistió en captar la descarga del vertedero en un recipiente graduado de 10 litros y cronometrar el tiempo necesario para llenarlo, lo cual se realizó durante los primeros minutos de lluvia. Se obtuvo un tiempo promedio de 2.22 segundos cuando el tirante de agua sobre el vertedero era de aproximadamente entre 2 y 3 cm. Con estos datos empíricos, se ajustó el coeficiente de descarga teórico a un valor de 2.65, logrando establecer una relación empírica confiable entre el tirante medido aguas arriba del vertedero y el caudal real.

b) Procedimiento de aforo:

Se ejecutó una campaña de monitoreo durante las tormentas ocurridas en los meses de abril y mayo de 2024. Para cada evento, se midió de forma continua la altura del agua (tirante) justo aguas arriba del vertedero mediante una regla instalada previamente. Las mediciones se realizaron a intervalos regulares de 5 a 10 minutos, dependiendo de la intensidad del evento. Con los datos obtenidos de altura, se aplicó la fórmula calibrada del vertedero rectangular, permitiendo la determinación precisa del caudal circulante en cada instante del registro.

En el evento ocurrido el 19/03/2024 donde la altura del agua sobrepasó el nivel del vertedero, invalidando la medición mediante dicho método, se recurrió al método del flotador. Este procedimiento consistió en lanzar un objeto flotante en un tramo recto y conocido del cauce, medir el tiempo que tardó en recorrer dicha distancia, y obtener así la velocidad superficial, para estimar la velocidad media del flujo. Finalmente, esta velocidad corregida se multiplicó por el área transversal medida del cauce, obteniendo así una estimación alternativa del caudal.

Ambas metodologías complementarias permitieron obtener una serie continua, confiable y precisa de caudales que posteriormente fue utilizada para analizar la relación entre el caudal líquido y el transporte de sedimentos en el tramo estudiado.

3.5.6. Fase de laboratorio

En esta etapa se realizaron análisis a las muestras recolectadas en campo, con el propósito de caracterizar el material presente en el cauce de la quebrada Calispuquio. En primer lugar, se aplicó el método de tamizado en seco, conforme a los procedimientos establecidos en la norma ASTM E11, lo que permitió determinar la distribución de tamaños de partícula de los

sedimentos de fondo. Asimismo, se evaluó la concentración de sedimentos en suspensión mediante el método gravimétrico, consistente en filtrar, secar y pesar el residuo sólido contenido en las muestras de agua.

A partir de los datos granulométricos, se construyeron las curvas acumuladas de distribución de tamaños, de las cuales se obtuvieron los diámetros representativos D10, D50 y D90, necesarios para la aplicación de fórmulas empíricas del gasto sólido de fondo.

3.5.7. Fase de gabinete

Elaboración de superficies.

Para la elaboración de superficies se usó el software de Autodesk AutoCAD Civil 3D 2018 y Qgis, utilizando una data de 75 millones de Puntos Topográficos de cada vuelo, generado un modelo digital de elevación (MDE) de una superficie de rejilla de 0.01 m. x 0.01 m. posteriormente se evaluó el volumen acumulado mediante análisis de diferencias de superficies en formato TIN.

Estimación de gasto sólido

La estimación del gasto sólido de fondo se realizó aplicando las fórmulas de Mora, Aguirre y Fuentes, Mizuyama y Shimohigashi, Parker, Klingeman y McLean, Schoklitsch, y Meyer-Peter y Müller. Para el gasto sólido en suspensión, se utilizó la curva de gasto de sedimentos.

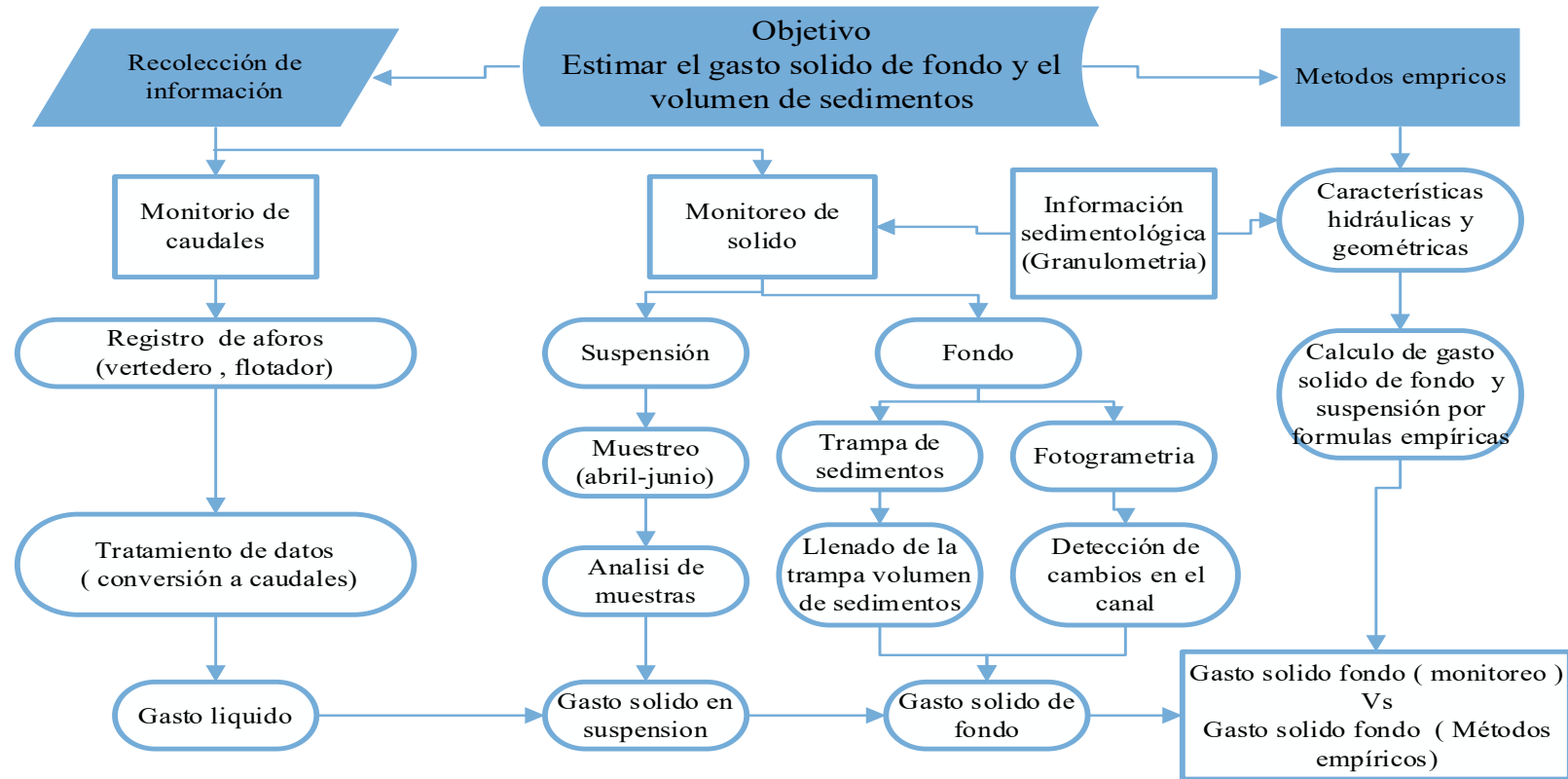
Validación de Resultados

Los resultados obtenidos de las fórmulas empíricas se validaron mediante la comparación con los datos de campo recolectados.

3.6.Procedimiento

El presente trabajo ha consistido de un de una serie de pasos para su realización, siguiendo los siguientes procedimientos para abordar los objetivos de la investigación.

Figura 15: Esquema de procedimientos de la investigación.



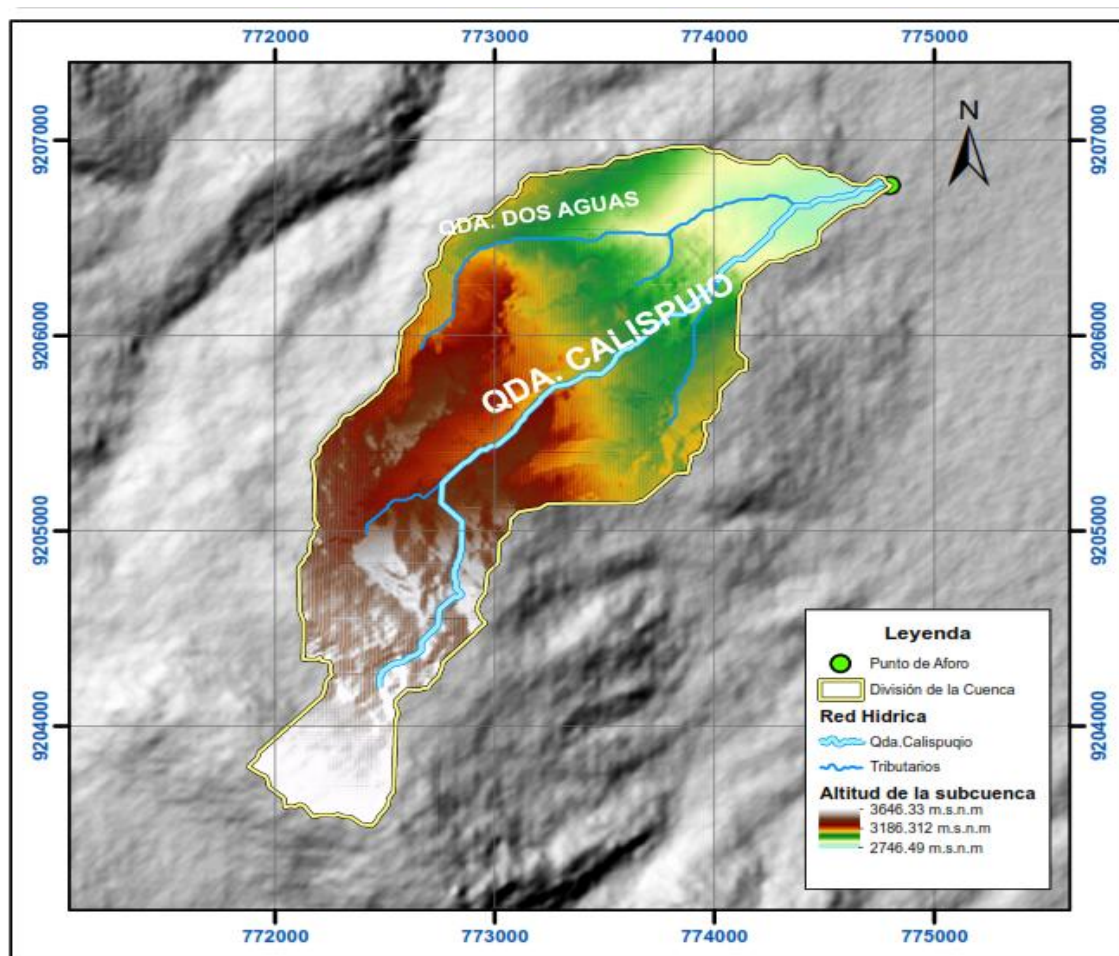
3.6.1. Caracterización de la cuenca

3.6.1.1 Parámetros geomorfológicos de la cuenca

La geomorfología de la cuenca de la quebrada Calispuquio es definida por la forma, relieve y drenaje, para lo cual se han establecido una serie de parámetros expresados a través de ecuaciones matemáticas.

Las características geomorfológicas fueron calculadas sobre el área total de la cuenca de la quebrada, que ha sido delimitada hasta el punto de aforo en el cauce de la quebrada. Se determinó los parámetros geomorfológicos de la cuenca de estudio empleando mosaicos de imágenes satelitales del obtenidas de la plataforma LAND VIEWER desarrollada por Earth Observing System, el procesamiento se realizó en la herramienta QGis 3.36 donde se calculó área y perímetro de drenaje, densidad de drenaje, pendiente de cauce, etc. Se inició por ubicar el punto de aforo, para así tener un estudio completo de las variables coexistentes en la cuenca.

Figura 16: Mapa de delimitación de la cuenca de la quebrada Calispuquio.



La figura 16 presenta la delimitación hidrológica de la cuenca de la quebrada Calispuquio, obtenida mediante análisis en SIG a partir de modelos digitales de elevación (MDE). Se identifica el área de drenaje que contribuye al flujo hacia el punto de salida ubicado aguas arriba del Jr. Nicolás Arriola. El mapa incluye la red hídrica principal, las divisorias de aguas y el punto de aforo. Esta delimitación permitió calcular parámetros geomorfológicos como área, perímetro, pendiente, densidad de drenaje y longitud del cauce principal, fundamentales para el análisis hidro sedimentológico del estudio.

Tabla 9. Parámetros geomorfológicos calculados

Datos de la cuenca		
Geometría		
Área	Km ²	3.93
Perímetro	km	11.23
Ancho	km	1.56
Largo	km	4.2721
Valores de las Cotas		
Cota mínima	msnm	2746.47
Cota Máxima	msnm	3646.31
Coordenadas		
Centroide X	m	773223.15
Centroide Y	m	9205380.70
Centroide Z	msnm	3186.312
Altitudes de la cuenca		
Altitud Media	msnm	3186.31
Altitud más frecuente	msnm	3145
Altitud de frecuencia (1/2)	msnm	3135.46
Pendiente de la cuenca		
Pendiente de la cuenca	%	30.72
Hidrografía		
Longitud del Cauce Principal	km	5.09
Orden de la red Hídrica	Adimensional	3
Longitud de la red Hídrica	km	8.12
pendiente promedio de la red hídrica	%	16.46

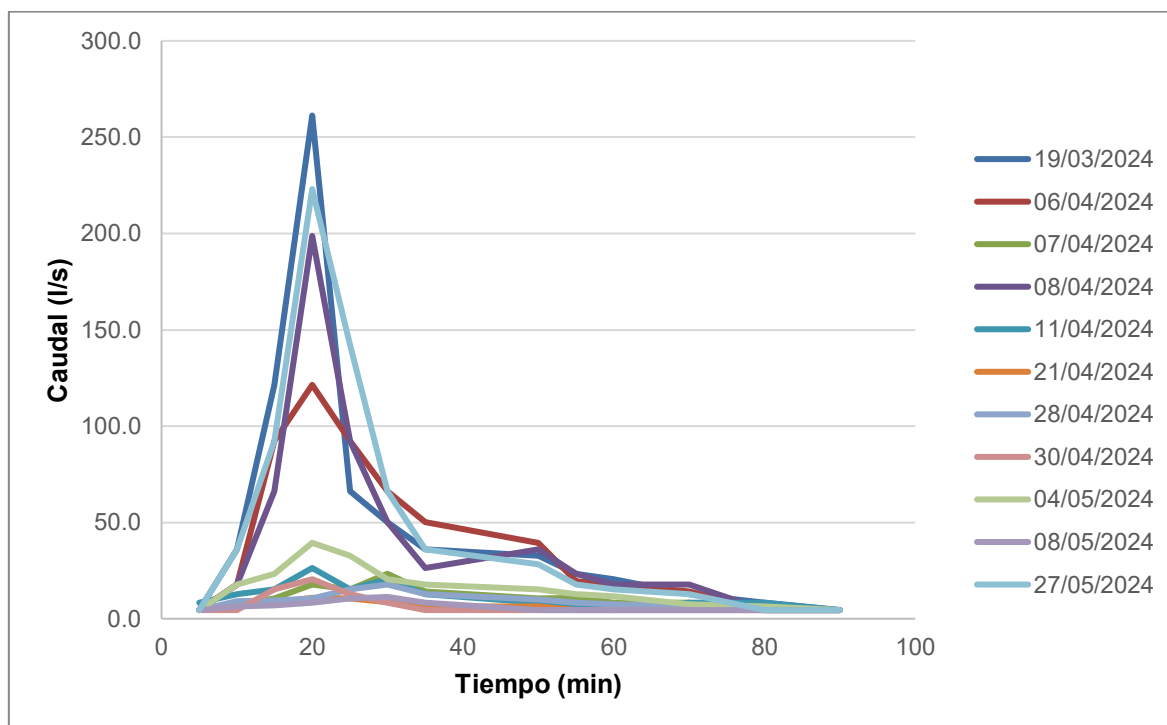
3.6.2. Recopilación de datos y procesamiento de información

- **Monitoreo de caudales**

Durante el período de monitoreo de caudales en la quebrada Calispuquio, llevado a cabo entre el 19 de marzo y el 27 de mayo de 2024, se realizaron mediciones para captar la variabilidad de los flujos durante eventos de lluvia. Se utilizó un vertedero rectangular de 0.6 metros de longitud con cresta aguda y un coeficiente de descarga (Cd) de 2.65, instalado dentro del cauce. Para medir los caudales bajos a moderados, se empleó el vertedero, mientras que el método del flotador se utilizó para caudales que superaron el nivel del

vertedero. La calibración del coeficiente de descarga del vertedero se realizó mediante el método volumétrico para el cual se utilizó balde de 10 litros. Las mediciones se efectuaron cada 10 minutos durante los eventos de lluvia.

Figura 17: Hidrograma de eventos monitoreados en la quebrada Calispuquio.



En la Figura 17 se reflejan los caudales con picos significativos que mostraron la respuesta rápida del cauce a las precipitaciones. Durante los eventos de lluvia, presentaron picos de caudal a los 20 minutos de iniciar la lluvia, luego hay una disminución gradual, donde el proceso de recesión es frecuente en los eventos de lluvia.

Aguas arriba del punto de aforo se realizó mediciones del tirante en el caudal pico durante las tormentas por el método del flotador para los eventos de lluvia en las fechas del 19/03/24, 08/04/24 y 27/05/24. Además, mediante reglas limnimetricas instaladas en la parte canalizada se comprobó nivel de agua en sector canalizado. En el vertedero se tomó las mediciones del tirante con lo cual se obtuvo los caudales mediante la ecuación (24).

Tabla 10. Área de cauce con el caudal pico.

Día/mes/año	Área (m ²)	Q(l/s)
19/03/2024	0.180	261.264
06/04/2024	0.108	121.424
07/04/2024	0.030	23.368
08/04/2024	0.150	198.750
11/04/2024	0.039	26.349

Día/mes/año	Área (m2)	Q(l/s)
21/04/2024	0.022	10.861
28/04/2024	0.021	17.777
30/04/2024	0.033	20.509
04/05/2024	0.051	39.403
08/05/2024	0.018	11.316
27/05/2024	0.162	223.071

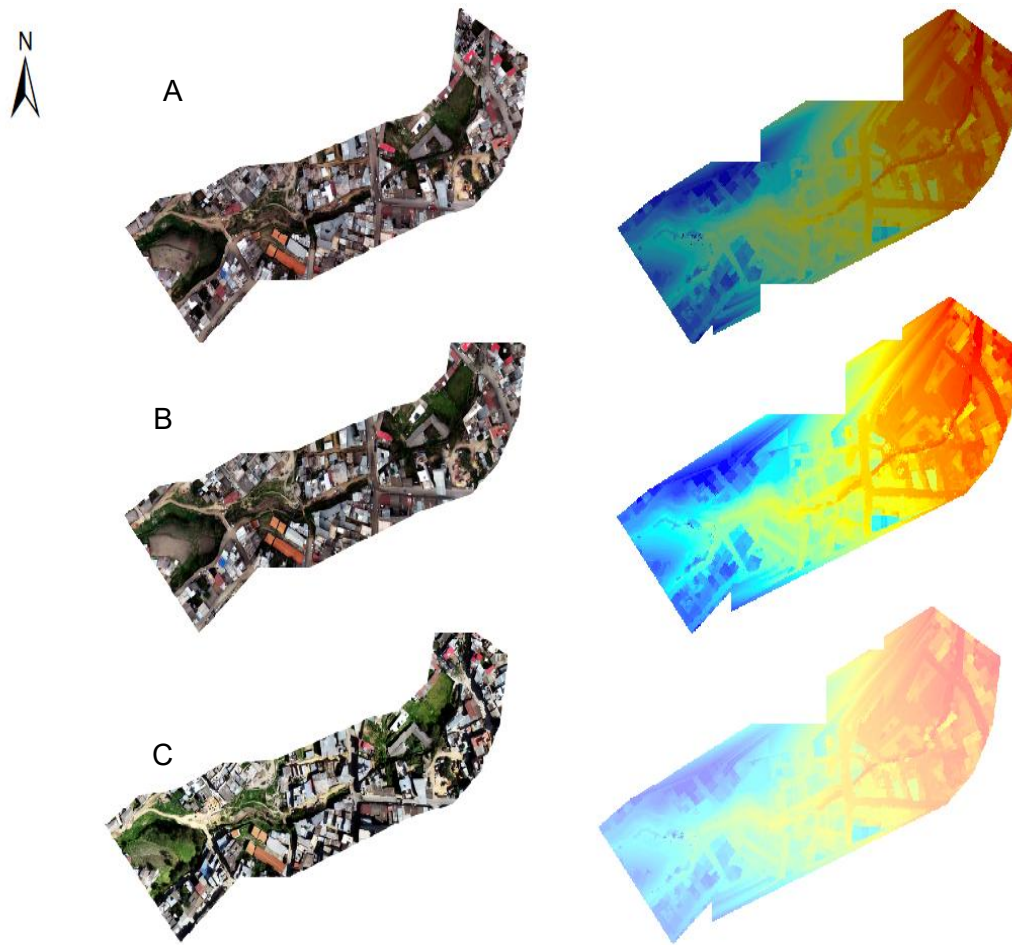
- **Monitoreo mediante fotogrametría**

Los modelos 4D permiten monitorear procesos geomórficos en resolución espacial a escala decimétrica en los andes del Perú (Rosas, M. et al. 2023). En el presente estudio se empleó un vehículo aéreo no tripulado (VANT), modelo Phantom 4 Pro, equipado con una cámara CMOS de 1 pulgada y una resolución de 20 megapíxeles, que permitió la captura de imágenes superpuestas para el desarrollo del modelo fotogramétrico. Las imágenes fueron procesadas con los softwares DJI GO 4 y Map Pilot, los cuales facilitaron la planificación automática de vuelos, así como la configuración y control de la aeronave. Como resultado, se generaron modelos digitales de elevación (MDE) de alta resolución, los cuales permitieron identificar con precisión zonas críticas del cauce donde se evidencian procesos activos de erosión y deposición de sedimentos.

Procesamiento Fotogramétrico.

A diferencia de la topografía clásica utilizando métodos y equipos topográficos convencionales, en donde se pone un especial énfasis en los procesos de importación de puntos, obtenidos de un levantamiento topográfico, para generar curvas de nivel y mejorar la superficie topográfica (interpolación, delimitación, suavizado), el levantamiento fotogramétrico utiliza una metodología de trabajo con otra orientación, cuando se trata de la generación de modelos de superficie a partir de imágenes aéreas, se tienen que seguir una serie de procesos de fotointerpretación, lo que nos conlleva a la generación de un Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir de un mallado, conformado por importación de puntos topográficos (nube de puntos densa), los mismos, que representan un lugar geométrico tridimensional, obtenido de una serie de fotografías aéreas, para finalmente fusionarlos con los 06 puntos topográficos de control, para obtener un Modelo Digital de Terreno representativo.

Figura 18 : Levantamiento fotogramétrico y generación del DEMS para el cauce de la quebrada Calispuquio en diferentes fechas



(A) 28 de octubre del 2023 (B) 03 de diciembre del 2024 (C) 06 de enero del 2024

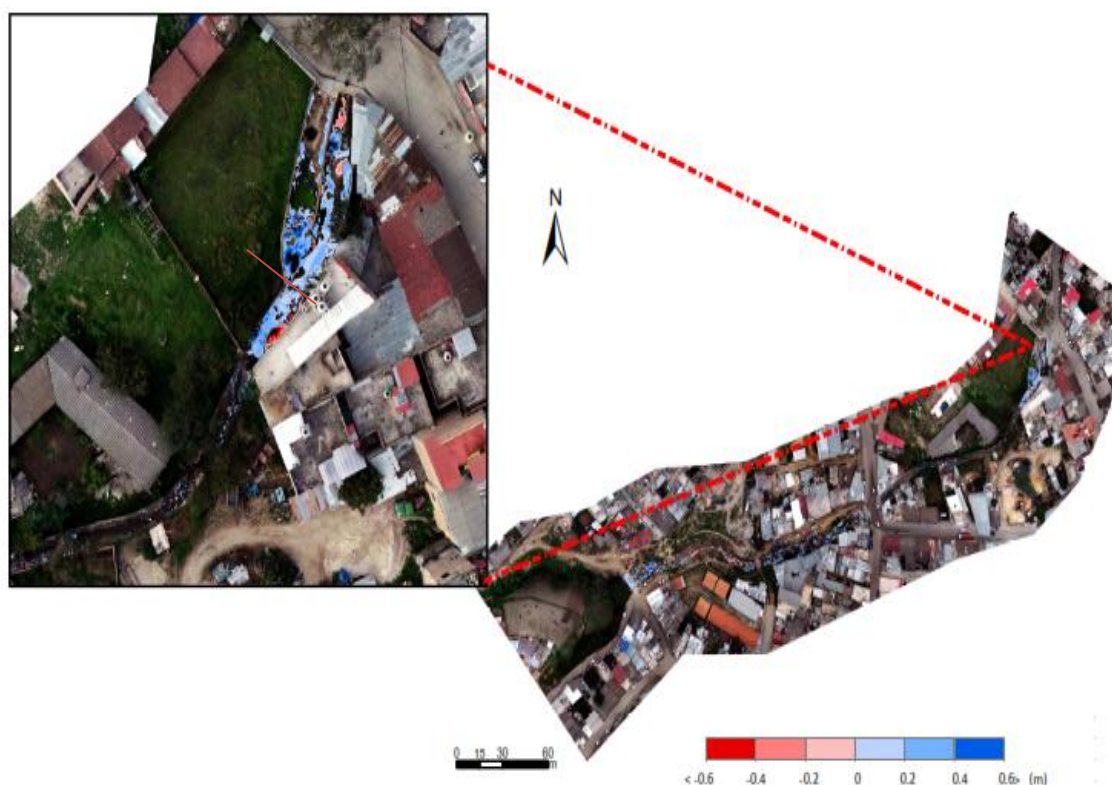
La figura 18 muestra los modelos digitales de superficie (DEMs) generados a partir de los levantamientos fotogramétricos realizados con dron en tres fechas específicas: (A) 28 de octubre de 2023, (B) 3 de diciembre de 2023 y (C) 6 de enero de 2024. Cada modelo representa la topografía detallada del cauce, permitiendo comparar los cambios morfológicos ocurridos en el lecho de la quebrada debido a procesos de erosión, depósito de sedimentos y acumulación por eventos de lluvia. Estas superficies sirvieron como base para el análisis de variación de elevaciones y cálculo de volúmenes de colmatación en el tramo de estudio.

El nivel de detección de deformaciones superficiales.

Los datos del sistema de fotogrametría PPK es de un área de 0.9 km² y se obtuvo la variación de superficies generados de los 3 levantamiento fotogramétrico entre los meses de octubre y enero, se logró detectar los cambios en el cauce y niveles de colmatación en la zona de estudio.

Dada la topografía accidentada, el material erosionado puede transportarse efectivamente y potencialmente acumularse aguas arriba de la canalización del Jr Nicolas Arriola, ya que se observaron en ese sector los mayores cambios en la elevación del canal como se muestra en la Figura 19.

Figura 19: Cambios verticales en la elevación de la superficie de la quebrada Calispuquio entre octubre y enero.



La figura 19 muestra el análisis de diferencia de superficies, elaborado a partir de los levantamientos fotogramétricos realizados en octubre de 2023 y enero de 2024, los cuales permiten visualizar los cambios topográficos ocurridos en el cauce. Las zonas en color más cálido indican acumulación de sedimentos (elevación positiva), mientras que los tonos más fríos señalan erosión (elevación negativa). Se evidencia un aumento de hasta 0.6 metros en varias secciones del tramo canalizado, siendo la acumulación más significativa en el sector aguas arriba del canal cubierto del Jr. Nicolás Arriola.

- **Monitoreo de sedimento medido en campo**

El volumen de sedimentos acumulado fue medido en el cauce en el sector no canalizado mediante una trampa de sedimentos en función del tiempo en el que se llena.

Las mediadas de la trampa de sedimentos fueron de 1.5 metros de ancho por 2.5 metros de largo y 0.5 de profundidad, su diseño estuvo en relación con el ancho de quebrada al no ser de gran tamaño, lo cual permitió su construcción de manera manual (ver Figura 38). La trampa fue construida en un tramo recto del cauce sin canalizar en la progresiva de 0+125 km.

Los sedimentos atrapados corresponden a la curva granulométrica de la muestra M-2 la cual está formada por el 42% de grava, 17% de arena gruesa y 41 % de arena fina, con una mínima cantidad de fino.

La trampa fue construida el día 18 de febrero del 2024 (ver Figura 38). Fecha desde que empezó el llenado con los sedimentos transportados por la corriente. Después de una visita al cauce cada 3 días se observó que se llegó a su límite máximo el día 24 de febrero del 2024, en este periodo de tiempo se observó episodios de lluvia, los cuales se registraron en la estación meteorología de la UNC, Cajamarca.

3.6.3. Estimación del Gasto sólido fondo

Para efectos de la estimación del gasto sólido de fondo se emplearon formulas empíricas que comúnmente se usan en estudios similares para cauces de alta pendiente, donde se determinaron los parámetros hidráulicos en función al comportamiento hidrológico y características granulométricas del material que conforma la quebrada Calispuquio en el tramo de estudio.

3.6.3.1 Características geométricas

Se obtuvo el perfil longitudinal del levantamiento fotogramétrico en el eje del cauce, que corresponde a un recorrido de 406 m aguas arriba del jr. Nicolás Arriola.

a. Ancho del cauce

El ancho del cauce fue determinado mediante un levantamiento topográfico realizado con fotogrametría. Con la superficie obtenida en Civil 3D, se realizaron secciones transversales cada 10 metros, desde la progresiva 0+00 km hasta la progresiva 0+247 km, antes de iniciar la canalización.

Figura 20: Vista en planta del tramo de estudio



La figura 20 muestra una vista en planta del tramo de estudio de la quebrada Calispuquio, ubicado aguas arriba de la canalización del Jr. Nicolás Arriola. En ella se representa la configuración espacial del cauce, las referencias geográficas principales y la distribución de las secciones presentadas en la tabla 11.

Tabla 11. Ancho de cauce

ANCHO DEL CAUCE					
Progresiva	Ancho (m)	Progresiva	Ancho (m)	Progresiva	Ancho (m)
0+10	1.95	0+110	3.3	0+220	3.37
0+20	1.9	0+120	2.8	0+230	3.2
0+40	2.4	0+130	2.5	0+247	3.3
0+30	3	0+140	2		
0+40	2.6	0+150	2.97		
0+50	2.9	0+160	2.9		
0+60	1.97	0+170	2.5		
0+70	2.9	0+180	3.1		
0+80	3	0+190	3.2		
0+90	2.7	0+200	3.3		
0+100	3	0+210	3.26		

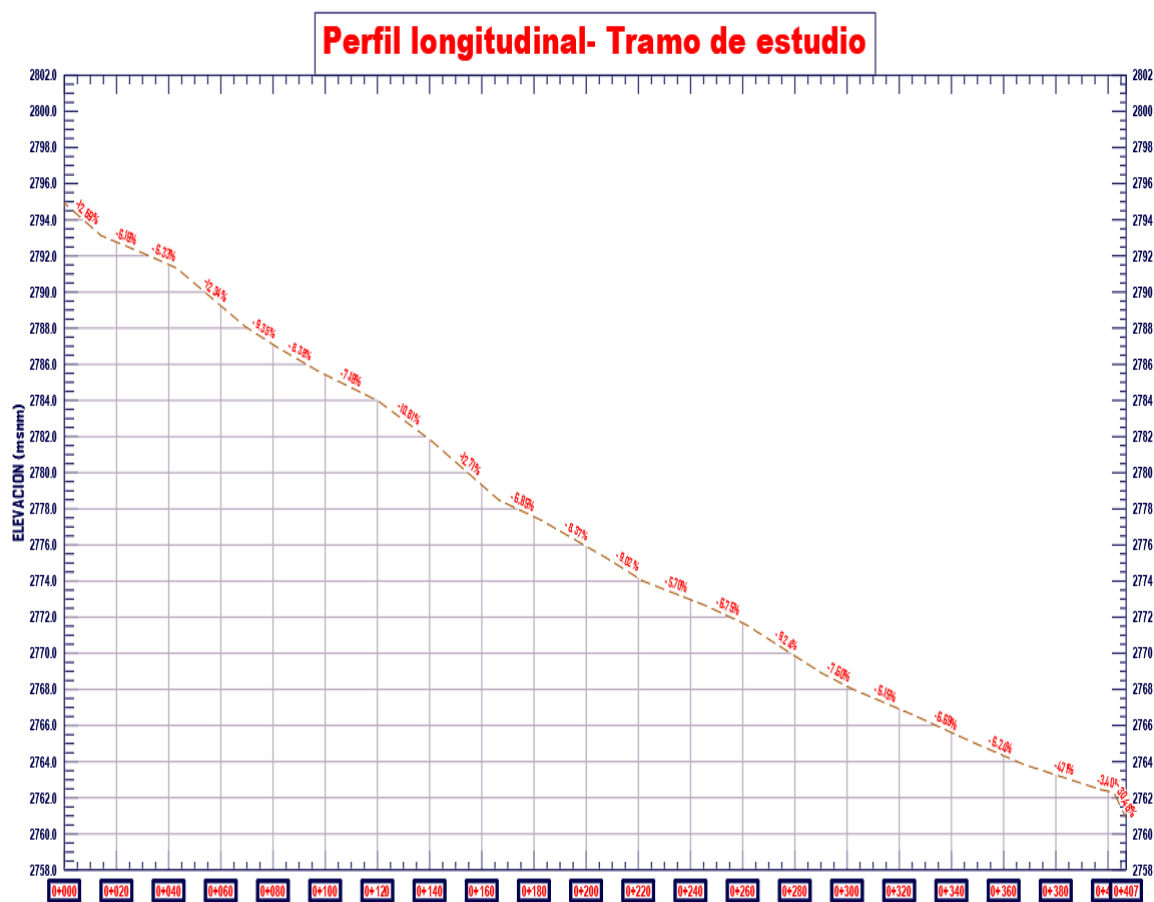
Los datos obtenidos indican que el ancho promedio del cauce es de aproximadamente 2.8 metros.

b. Pendiente promedio de la quebrada Calispuquio antes de la canalización

Se utilizó el software Civil 3D para generar el perfil longitudinal del eje del cauce de la quebrada Calispuquio. La pendiente promedio fue trazada considerando el tramo previo a la canalización, comprendido entre las progresivas 0+000 km y 0+247 km, obteniéndose una pendiente de 9.21 % (ver Figura 21).

El tramo canalizado presenta una pendiente promedio de 6.9% hasta la progresiva 0+370 km y baja hasta una pendiente a 4.5 % hasta la progresiva 0+400 km.

Figura 21: Perfil longitudinal del tramo de estudio en quebrada Calispuquio.



c. Evaluación granulométrica

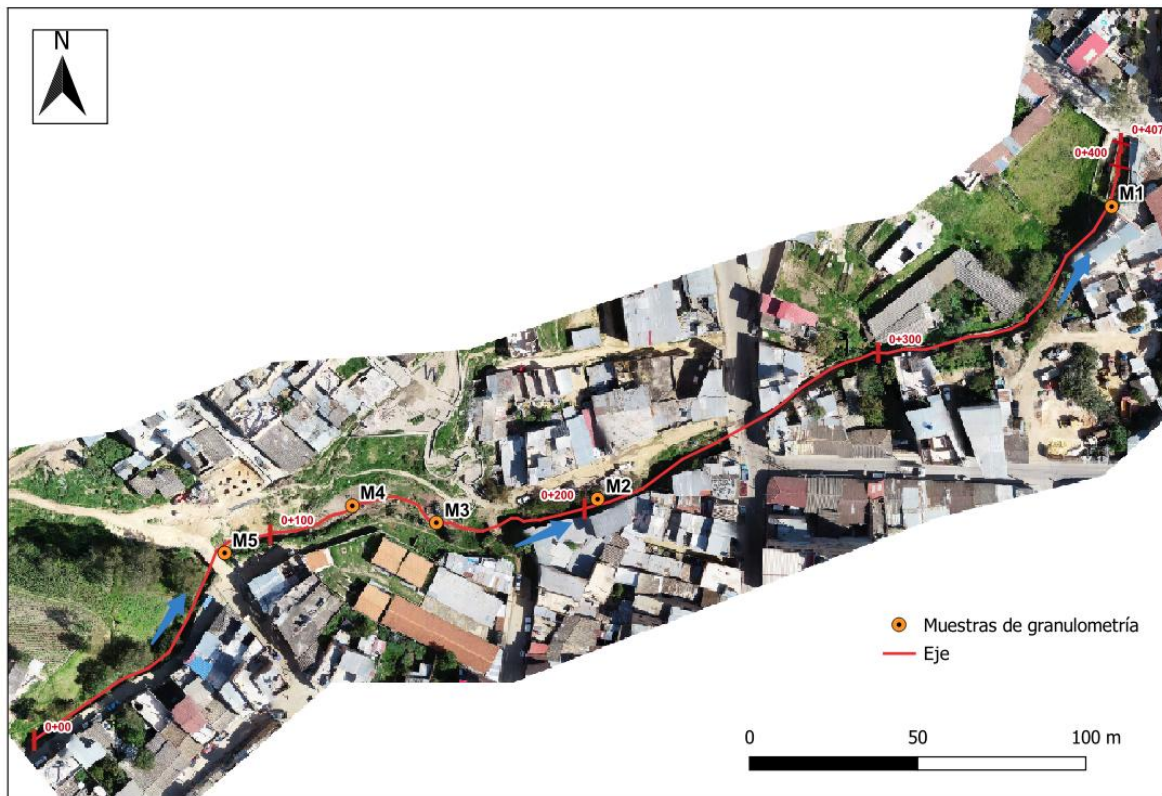
Para la evaluación granulométrica, se tomó en consideración el manual de hidrología, hidráulica y drenaje vial, el cual indica que las muestras extraídas deben ser tomadas en al menos cuatro puntos del cauce. En el tramo de estudio, la quebrada presenta poco espacio de movilidad en los márgenes debido a las construcciones realizadas, lo que ha provocado la erosión de las orillas en la parte alta.

El cauce en este sector presenta un lecho conformado mayormente por arenas gruesas y finas. El talud de ambos márgenes del río está conformado en casi su totalidad por depósitos de arenas y areno-arcillosa.

d. Recolección y Análisis de Muestras

En este tramo se tomaron 5 muestras de granulometría en el lecho del cauce, las cuales se identifican como M-1 a la M-5.

Figura 22: Ubicación de puntos de muestreo para análisis granulométrico.

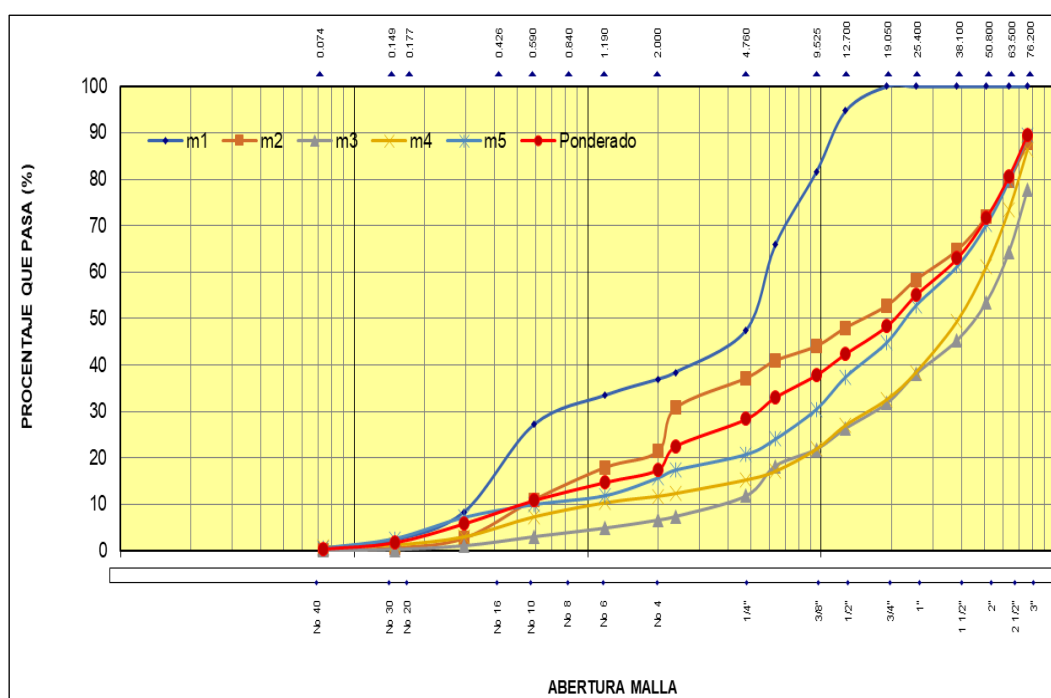


En la Figura 22 se muestra la ubicación georreferenciada de los puntos de muestreo a lo largo del tramo de la quebrada Calispuquio. La muestra M1 fue tomada en tramo canalizado donde se identificó una acumulación de sedimentos. Las muestras M-2 a la M-5 se tomaron en la trampa de sedimentos y a lo largo del cauce, obteniéndose las 5 curvas granulometría con la que se aproximó valores de coeficientes de rugosidad en la zona central y márgenes de la quebrada, además de los datos utilizados en las fórmulas empíricas.

e. Muestreo de materia sub superficial

Para el análisis granulométrico se realizó mediante el tamizado, los tamices están certificados mediante la especificación estándar de la norma ASTM E11. Los tamices utilizados fueron desde el tamiz N 3" al N°200 como se observa en la Figura 23.

Figura 23: Curvas granulométrica del cauce- quebrada Calispuquio.



La Figura 22 muestra la curva presentada representa un promedio ponderado de las muestras, en función de la ubicación y longitud representativa de cada tramo de muestreo. Esta metodología permitió asignar un peso proporcional a cada muestra según el segmento del cauce que representa, obteniendo así una caracterización granulométrica más representativa del tramo en estudio. A partir de esta curva, se determinaron los diámetros efectivos (D10, D30, D50, D60), cuyos valores se presentan en la Tabla 12 y fueron utilizados en los cálculos del transporte de sedimentos.

Tabla 12. Diámetros efectivos de la curva granulométrica ponderada.

Diámetros efectivos	
D16(mm)=	1.55 mm
D35(mm)=	7.63 mm
D40(mm)=	11.00 mm
D50(mm)=	20.58 mm
D84(mm)=	68.26 mm
D90(mm)=	76.78 mm

f. Densidad aparente de los sedimentos

Se llevó a cabo la determinación de la densidad in situ del suelo utilizando el método del cono de arena, conforme a la norma ASTM D-1556. Para este ensayo, se realizó una calicata en el margen izquierdo del cauce de la quebrada Calispuquio. El ensayo requiere de una densidad conocida, por la cual la arena de reemplazo tiene un certificado de la densidad con

1.445 g/cm³. Los resultados indicaron un volumen del hueco de 1305.9 cm³ y un peso de la muestra húmeda de 3580.0 g. A partir de estos datos, se calculó la densidad aparente del suelo en 2.741 g/cm³.

g. **Peso específico**

Para obtener el peso específico de los sedimentos, se han tomado el material de los 5 puntos de muestreo y se obtenido mediante la formula (8) .

Tabla 13. Cálculo de peso específico

Muestra	Descripción	Und.	M1	M2	M3	M4	M5
<i>V_i</i>	Volumen del agua (inicial)	cm ³	500	500	500	500	500
<i>V_f</i>	Volumen del agua más la muestra (final)	cm ³	704	750	720	710	705
<i>W_s</i>	peso de la muestra secada al horno	gr	500.3	580.1	501.2	510.8	509.7
<i>γ_s</i>	Peso específico de sedimentos	gr/cm ³	2.45	2.32	2.28	2.43	2.49
<i>γ_s</i>	Peso específico de sedimentos promedio	2.39					

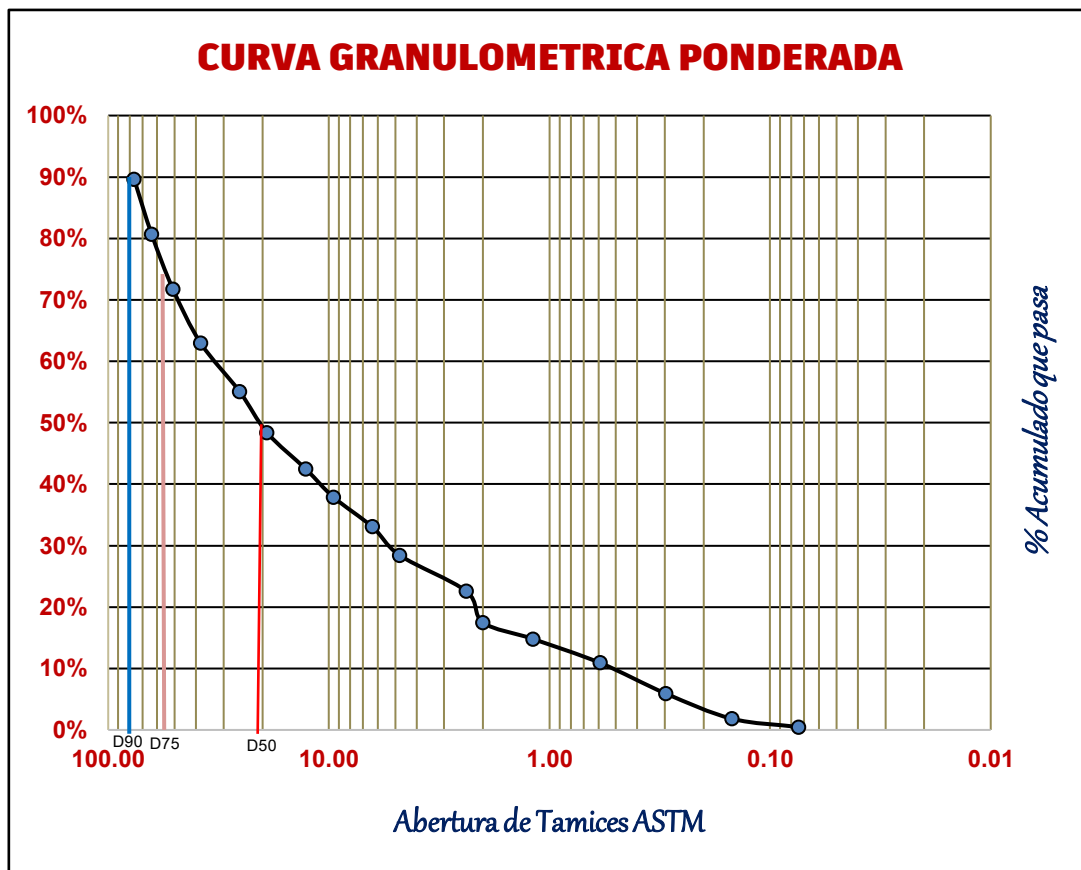
h. **Coefficiente de rugosidad**

Se determinó el coeficiente de rugosidad de la expresión de Manning, que es un factor hidráulico muy importante para el cálculo de perfiles de flujo en ríos, canales y quebradas. No obstante, se utilizaron métodos teóricos y empíricos para determinar el valor de coeficiente de rugosidad más representativo en el tramo de la quebrada Calispuquio evaluado.

Por lo tanto, se emplearon metodologías teóricas como el método de Cowan. Además, de las ecuaciones empíricas de diversos autores hidráulicos. Los resultados obtenidos se compararon con los datos obtenidos en campo mediante simulación en el software Hec ras para calibrar los valores Manning.

Las ecuaciones matemáticas aplicadas para determinar el coeficiente de rugosidad de la expresión de Manning, dependieron de la curva granulométrica representativa del material extraído de cauce de la quebrada.

Figura 24: Curva granulométrica ponderada



Para efectos del cálculo de coeficiente de Manning se utilizó el resultado de la ecuación de Bray, donde se ha obtenido un valor de coeficiente de rugosidad equivalente de $n = 0.027$. Este valor se utilizó como el valor básico de n en la fórmula de Cowan.

Cálculo de “ n ” por Cowan Arcement Schneider (1956)

Se desarrolló un método para evaluar el coeficiente de rugosidad en canales naturales.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad (53)$$

Donde:

n_0 = Valor básico de n	0.027
n_1 = Valor adicional para tomar en cuenta irregularidades de la superficie	0.010
n_2 = Valor adicional para tomar en cuenta las variaciones en tamaño y forma de la sección transversal	0.010
n_3 = Valor adicional para tomar en cuenta las obstrucciones	0.015
n_4 = Valor adicional para tomar en cuenta el efecto de la vegetación	0.005
m = Factor para tomar en cuenta la sinuosidad del canal (meandros)	1.00

El “n” básico es el obtenido del cuadro de rugosidades del libro de Ven Te Chow “Hidráulica de Canales Abiertos”.

Tabla 14. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad según el método de Cowan.

Correcciones para el n de Manning				
Condiciones de flujo			Valores	
Tipo de material en el perímetro del canal	Tierra	Arena, limo, y arcilla	n ₀	0.020
	Corte en roca	Afloramiento de la roca		0.025
	Grava fina	Grava de hasta 8 mm de diámetro		0.024
	Grava gruesa	Grava de más de 8 mm de diámetro		0.028
Grado de irregularidades en la superficie	Liso	La mejor condición	n ₁	0.000
	Menor	Canales bien dragados, con pendientes laterales poco erosionadas		0.005
	Moderado	Canales poco dragados, con pendientes laterales moderadamente erosionadas		0.010
	Severo	Canales muy erosionados, con superficies altamente irregulares y/o excavadas en roca gruesa		0.020
Variaciones en la forma y tamaño de la sección transversal	Gradual	Variaciones suaves o pequeñas	n ₂	0.000
	Alternadas ocasionalmente	Secciones grandes y pequeñas alternadas ocasionalmente, con desplazamiento lateral del flujo		0.005
	Alternadas con frecuencia	Secciones grandes y pequeñas alternadas con frecuencia, con desplazamiento lateral frecuente del flujo		0.010 - 0.015
Efecto de obstrucciones	Despreciable	(a) La medida en que las obstrucciones ocupan o reducen el área de flujo, (b) El carácter de las obstrucciones (bordes agudos u objetos angulares, los cuales inducen una mayor turbulencia que los objetos de superficie curva o lisa), y (c) El lugar y espaciamiento de las obstrucciones, transversales y longitudinales, a lo largo del canal	n ₃	0.000
	Menor			0.010 - 0.015
	Apreciable			0.015 - 0.030
	Mayor			0.030 - 0.060
Efecto de la vegetación	Bajo	Césped o maleza, en la cual la profundidad de flujo es de 2 a 3 veces la altura de la vegetación	n ₄	0.005 - 0.010
	Medio	Césped o maleza, en la cual la profundidad del flujo es de 1 a 2 veces la altura de la vegetación		0.010 - 0.025
	Alto	Césped o maleza, en la cual la profundidad de flujo es casi igual a la altura de la vegetación		0.025 - 0.050
	Muy alto	Césped o maleza, en la cual la profundidad del flujo es menos de la mitad (1/2) de la altura de la vegetación		0.050 - 0.100
Sinuosidad del canal	Baja	Sinuosidad menor a 1.2	m	1.00
	Media	Sinuosidad entre 1.2 y 1.5		1.15
	Alta	Sinuosidad mayor a 1.5		1.30

Fuente: (Chow, V. 1959)

Utilizando los valores definidos según el método de Cowan, se obtiene un valor del coeficiente de rugosidad equivalente a $n = 0.062$

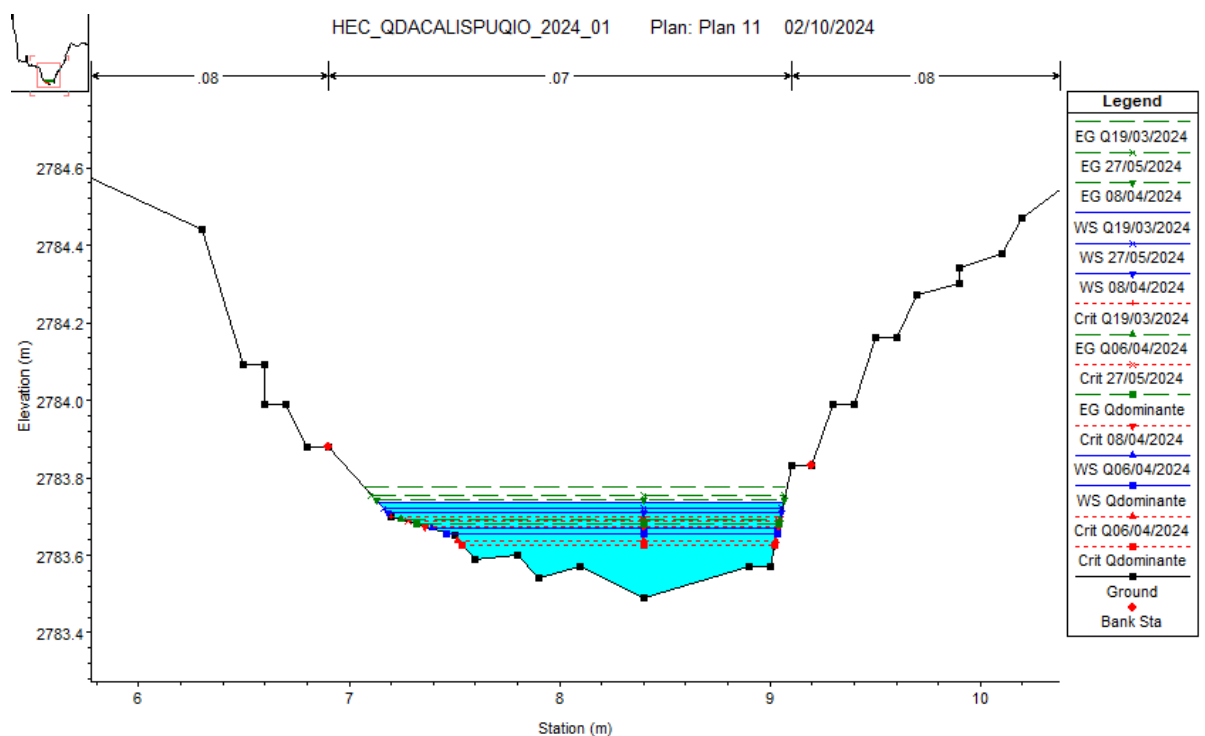
3.6.3.2 Parámetros hidráulicos y caudal dominante

Los parámetros hidráulicos del río se realizó mediante el software Hec-ras con el uso del modelo digital de elevación generado mediante fotogrametría del 06 de enero del 2024. el modelo fue calibrado mediante los aforos realizados en los días 19/03/2024, 06/04/24, 08/04/2024 y 27/05/2024 realizados Figura 17.

Del modelo se extrajo el radio hidráulico para los días en los que se realizó las mediciones. Las etapas seguidas para este proceso fueron las siguientes:

- Importación del modelo digital del terreno (MDT): Se importó el modelo digital del terreno al software HEC-RAS mediante la herramienta RAS Mapper, el cual permitió definir las condiciones topográficas del área de estudio.
- Asignación de rugosidades: Se ingresaron los coeficientes de rugosidad tanto en el cauce como en los márgenes.
- Ingreso de caudales y aforos: Posteriormente, se añadieron los datos de caudales medidos en campo, correspondientes a los aforos realizados.
- El valor de Manning fue calibrado mediante simulaciones en Hec-ras usando los tirantes y los caudales medidos en campo obtenido un valor de $n=0.07$ mientras que para sus laderas se consideró un valor de $n=0.08$. Esta consideración bajo el criterio de distribución de velocidades en cursos naturales de agua (hidráulica fluvial), que nos indica que las mayores velocidades se encuentran en el centro de un canal, por lo tanto, el coeficiente de rugosidad decrece.
- En los tramos donde el cauce esta canalizado se consideró un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.016 en las paredes con concreto.

Figura 25: Sección de la quebrada Calispuquio aguas arriba del punto de aforo



Fuente: HEC-RAS.

Se obtuvieron los valores de la progresiva 0+120 siendo la sección donde se tomó las mediciones en campo para el método del flotador y se calibro el modelo hidráulico. En la Tabla 15 se muestran los valores registrados, junto con las demás variables requeridas para la aplicación de las fórmulas para la estimación del gasto sólido.

Tabla 15. Características de la sección de control en el cauce de la quebrada Calispquio

Fecha	Sitio	Ancho medio	velocidad (m/s)	Radio hidráulico (m)	Coefficiente de rugosidad "n"	Tirante (m)
19/03/2024	QDA CALISPQUIO	1.5	2.17	0.07	0.07	0.16
06/04/2024	QDA CALISPQUIO	1.18	1.82	0.05	0.07	0.12
07/04/2024	QDA CALISPQUIO	0.65	1.4	0.02	0.07	0.07
08/04/2024	QDA CALISPQUIO	1.36	2.04	0.06	0.07	0.15
11/04/2024	QDA CALISPQUIO	1.16	1.66	0.05	0.07	0.12
21/04/2024	QDA CALISPQUIO	0.46	0.97	0.02	0.07	0.06
28/04/2024	QDA CALISPQUIO	0.71	0.94	0.02	0.07	0.08
30/04/2024	QDA CALISPQUIO	0.76	0.97	0.03	0.07	0.08
04/05/2024	QDA CALISPQUIO	0.99	1.23	0.03	0.07	0.09
08/05/2024	QDA CALISPQUIO	0.54	0.85	0.02	0.07	0.07
27/05/2024	QDA CALISPQUIO	1.42	2.05	0.06	0.07	0.16

Los resultados que se obtuvieron son los caudales picos de cada fecha de monitoreo entre los meses de abril y junio del 2024.

Para el cálculo el cálculo del caudal dominante se realizó mediante a la ecuación 6 considerando el área promedio de los aforos realizados en los días 19/03/2024, 06/04/24, 08/04/2024 y 27/05/2024 al presentar eventos de lluvia donde el flujo abarca el ancho promedio del cauce. La pendiente considera fue la del tramo no canalizado.

- **Área de flujo:** $A_f=1.7653$
- **Pendiente del cauce:** $S=0.07$

Sustituyendo estos valores en la ecuación:

$$Q = 4 \times A_f^{1.21} S^{0.28} \quad (54)$$

$$Q = 4 \cdot (1.7653)^{1.21} \cdot (0.07)^{0.28}$$

El caudal dominante calculado fue de 3.7649 pies³/s. equivalente 106.6 L/s desde el cual empieza el transporte de sedimentos presenta mayor incidencia y turbiedad del flujo.

Tabla 16. Variables obtenidas del modelo hidráulico con el caudal dominante

Caudal(l/s)	Perímetro Mojado (m)	Ancho medio (m)	Radio Hidráulico (m)	Coefficiente de rugosidad de Manning “n”	Tirante medio (m)
106.6	1.35	1.16	0.05	0.07	0.12

3.6.3.3 Estimación de gasto sólido de fondo mediante fórmulas empíricas

Si bien en la Tabla 5 nos muestra la gran variedad de formulaciones para su estimación se seleccionaron cinco formulaciones utilizadas para cuencas de alta montaña. Estas son Meyer-Peter y Müller (1948), Schoklitsch (1962), Parker, Klingeman y Mc Lean (1982), Mizuyama y Shimohigashi (1985) y Mora, Aguirre Y Fuentes (1990). Las cuales cumplen en tener dentro de su rango de aplicación las muestras extraídas del sedimento.

Los datos necesarios para la estimación del gasto sólido de fondo fueron obtenidos a través de trabajos de campo, específicamente mediante aforos, fotogrametría y muestreos de sedimentos. Estos incluyen las características geométricas del cauce, obtenidas mediante levantamientos topográficos, como el ancho y la pendiente, así como los parámetros físicos del sedimento, tales como el peso específico del sedimento (kg/m^3) y diámetros característicos del sedimento (mm). En gabinete, se determinaron el coeficiente de rugosidad de Manning, el perímetro mojado, el tirante medio y el radio hidráulico para el caudal dominante (ver Tabla 16).

Cada formulación presenta distintas variables; embargo para no presentar repeticiones se indican las más usuales:

Densidad relativa de las partículas en el agua obtenida de la fórmula N° (12):

$$\Delta = 1.39$$

Rugosidad de las partículas en fondo plano obtenida de la formula N° (31)

$$n_s = 0.025$$

Fórmula de Meyer-Peter y Müller (1948):

Esfuerzo cortante del flujo sobre el fondo obtenido de la fórmula N° (20) para el caudal dominante:

$$\tau_* = 0.14$$

$$g_B = 8 * 2390(9.81(1.39)0.0205^3)^{0.5} \left[\frac{0.025^{1.5}}{0.027} * 0.14 - 0.047 \right]^{1.5}$$

$$g_B = 6.305 \text{ kg/s} \cdot \text{m}$$

Fórmula de Schoklitsch (1962):

Para $D \geq 0.006\text{m}$ se aplica la fórmula N°(34):

$$g_B = 2500(0.0921)^{\frac{1}{3}} \left(0.091 * 0.0921^{\frac{7}{6}} - 0.26 * 1.39^{\frac{5}{3}} 0.011^{3/2} \right)$$

$$g_B = 5.799 \text{ kg/s} \cdot \text{m}$$

Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (1982):

Para obtener el esfuerzo hidráulico normalizado a partir de la fórmula N°(38)

$$\phi_{50} = 1.55$$

Para obtener el esfuerzo hidráulico adimensional se obtiene de la formula N°(39)

$$\tau_{50}^* = 0.14$$

Para $0.95 < \phi_{50} < 1.65$ el parámetro W^* se obtiene de la formula N°(40)

$$W^* = 3.69$$

El gasto sólido está dado por la fórmula N° (37)

$$g_B = 1400 \left(\frac{3.69 * 9.81^{1/2} (0.12 * 0.0921)^{3/2}}{2.65} \right)$$

$$g_B = 0.006 \text{ kg/s} \cdot \text{m}$$

Mizuyama y Shimohigashi (1985):

$$g_B = 20 \frac{0.0921^2}{1.39^2} \frac{0.091}{\sqrt{9.81 * 1.39 * 0.020^3}}$$

$$g_B = 0.736 \text{ kg/s} \cdot \text{m}$$

Método de Mora, Aguirre Y Fuentes (1990):

$$d/D_{50} = 5.83$$

La relación es menor a 10 por lo cual se puede aplicar el método de Método de Mora, Aguirre y Fuentes.

- Como $S=0.00921$ se considera $\cos \alpha=1$ y $\tan \alpha=0$
- A partir de la Figura 12, el ángulo de fricción interna es 34° para el diámetro $D_{50}=20.57\text{mm}$

La velocidad de referencia se obtiene de la formula N° (45)

$$U_0 = 0.212$$

El coeficiente adimensional de Chezy se obtiene de la formula N° (47)

$$C_a = 7.81$$

El número de Froude densimétrico se obtiene de la formula N° (48)

$$F=2.874$$

El número de Froude densimétrico critico se obtiene de la formula N°(49)

$$F_c = 2.57$$

El gasto sólido está dado por la fórmula N° (44)

$$g_B = 0.0072 \cdot 2650 \cdot 0.0921 \cdot 7.81 \cdot 0.0205 \cdot 0.474 \cdot (2.874^2 - 2.48^2)^{0.5}$$

$$g_B = 2.19 \text{ kg/s} \cdot \text{m}$$

Tabla 17. Resultado de gasto sólido en $\text{kg/s} \cdot \text{m}$ de la quebrada Calispuquio, para los aforos realizados.

Fecha	Caudal (m^3/s)	Meyer- Peter y Müller ($\text{kg/s} \cdot \text{m}$)	Fórmula de Schoklitsch ($\text{kg/s} \cdot \text{m}$)	Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean ($\text{kg/s} \cdot \text{m}$)	Mizuyama y Shimohigashi ($\text{kg/s} \cdot \text{m}$)	Método de Mora, Aguirre Y Fuentes ($\text{kg/s} \cdot \text{m}$)
19/03/2024	0.26	12.684	11.526	0.016	1.396	0.413
06/04/2024	0.12	6.305	6.520	0.006	0.819	0.306
07/04/2024	0.02	0.229	1.564	-	0.248	0.215
08/04/2024	0.2	9.311	9.690	0.016	1.185	0.378
11/04/2024	0.11	6.305	6.040	0.006	0.764	0.219

Fecha	Caudal (m³/s)	Meyer-Peter y Müller (kg/s·m)	Fórmula de Schoklitsch (kg/s·m)	Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (kg/s·m)	Mizuyama y Shimohigashi (kg/s·m)	Método de Mora, Aguirre Y Fuentes (kg/s·m)
21/04/2024	0.01	0.229	0.933	-	0.175	-
28/04/2024	0.02	0.229	1.382	-	0.227	-
30/04/2024	0.02	1.633	1.253	-	0.212	-
04/05/2024	0.04	1.633	2.237	-	0.325	-
08/05/2024	0.01	0.229	0.708	-	0.149	-
27/05/2024	0.22	9.311	10.240	0.016	1.248	0.378

Tabla 18. Resultado de gasto sólido en kg/s de la quebrada Calispuquio, para los aforos realizados

Fecha	Caudal (m³/s)	Meyer-Peter y Müller (kg/s)	Fórmula de Schoklitsch (kg/s)	Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (kg/s)	Mizuyama y Shimohigashi (kg/s)	Método de Mora, Aguirre Y Fuentes (kg/s)
19/03/2024	0.26	35.515	32.272	0.046	3.910	1.157
06/04/2024	0.12	17.653	18.256	0.018	2.294	0.857
07/04/2024	0.02	0.640	4.379	-	0.694	0.602
08/04/2024	0.2	26.070	27.131	0.045	3.317	1.059
11/04/2024	0.11	17.653	16.912	0.018	2.139	0.614
21/04/2024	0.01	0.640	2.612	-	0.490	-
28/04/2024	0.02	0.640	3.870	-	0.635	-
30/04/2024	0.02	4.573	3.508	-	0.594	-
04/05/2024	0.04	4.573	6.264	-	0.911	-
08/05/2024	0.01	0.640	1.982	-	0.418	-
27/05/2024	0.22	26.070	28.671	0.045	3.494	1.060
Q. Dominante	0.106	17.653	16.238	0.018	2.061	0.614

Tabla 19. Resultado de gasto sólido en m³/s de la quebrada Calispuquio, para los aforos realizados

Fecha	Caudal (m³/s)	Meyer-Peter y Müller (m³/s)	Fórmula de Schoklitsch (m³/s)	Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (m³/s)	Mizuyama y Shimohigashi (m³/s)	Método de Mora, Aguirre Y Fuentes (m³/s)
19/03/2024	0.26	1.49E-02	1.35E-02	1.93E-05	1.64E-03	4.84E-04
06/04/2024	0.12	7.39E-03	7.64E-03	7.57E-06	9.60E-04	3.59E-04
07/04/2024	0.02	2.68E-04	1.83E-03	-	2.90E-04	2.52E-04
08/04/2024	0.2	1.09E-02	1.14E-02	1.87E-05	1.39E-03	4.43E-04
11/04/2024	0.11	7.39E-03	7.08E-03	7.57E-06	8.95E-04	2.57E-04

Fecha	Caudal (m³/s)	Meyer-Peter y Müller (m³/s)	Fórmula de Schoklitsch (m³/s)	Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (m³/s)	Mizuyama y Shimohigashi (m³/s)	Método de Mora, Aguirre Y Fuentes (m³/s)
21/04/2024	0.01	2.68E-04	1.09E-03	-	2.05E-04	-
28/04/2024	0.02	2.68E-04	1.62E-03	-	2.66E-04	-
30/04/2024	0.02	1.91E-03	1.47E-03	-	2.48E-04	-
04/05/2024	0.04	1.91E-03	2.62E-03	-	3.81E-04	-
08/05/2024	0.01	2.68E-04	8.29E-04	-	1.75E-04	-
27/05/2024	0.22	1.09E-02	1.20E-02	1.87E-05	1.46E-03	4.43E-04
Q. Dominante	0.106	7.39E-03	6.79E-03	7.57E-06	8.62E-04	2.57E-04

3.6.4. Sedimento en suspensión

Para la determinación de los sedimentos en suspensión, se llevó a cabo un muestreo puntual siguiendo un protocolo del proyecto SO HYBAM para recoger datos de sedimentos en la Amazonía. Se emplearon botellas de plástico de medio litro para la recolección de muestras, las cuales fueron etiquetadas nivel de agua en el punto de aforo, hora y fecha de recolección. Las muestras fueron recogidas durante eventos de lluvia del mes de abril y mayo.

a) Procesamiento de las muestras

Una vez recolectadas las muestras de sedimentos en suspensión, se procedió a su procesamiento en el laboratorio de la UNC siguiendo protocolos del proyecto SOHYBAM. Inicialmente, cada muestra fue vertida en una probeta para obtener su volumen, luego fue filtrada utilizando papel filtro de celulosa con un peso previamente registrado en la balanza analítica. El filtrado permitió separar el sedimento del agua.

Posteriormente, los filtros con sedimento fueron secados en un horno a 105°C por 12 horas hasta alcanzar un peso constante. El peso del filtro seco más el sedimento fue registrado y comparado con el peso inicial del filtro para determinar la masa de los sólidos suspendidos.

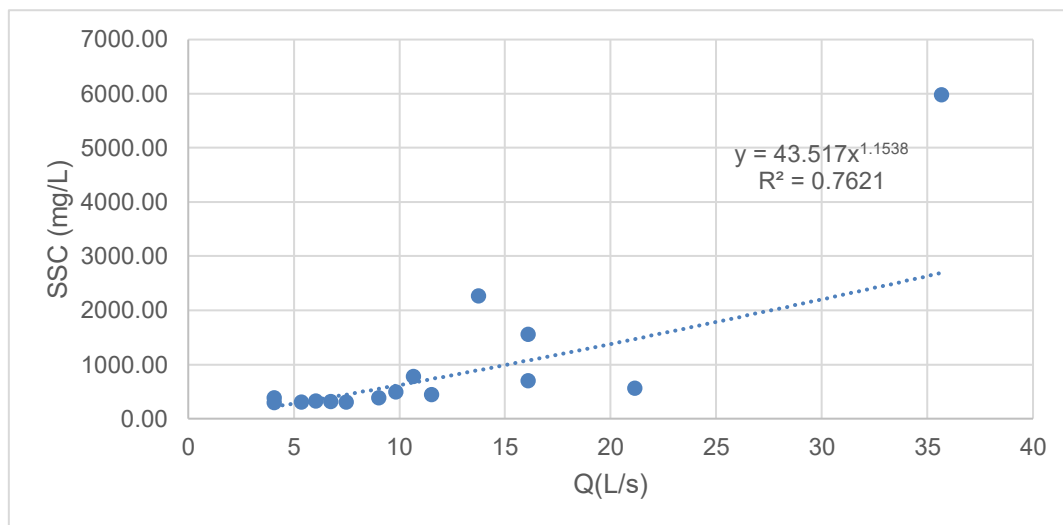
Las concentraciones de sedimentos en suspensión se calcularon utilizando la diferencia de peso entre el filtro seco con sedimento y el filtro vacío, por el volumen de agua de la muestra. Este procedimiento permitió obtener valores precisos de concentración de sedimentos en suspensión en miligramos por litro (mg/l).

Este proceso se realizó para cada una de las muestras recolectadas, obtenidos durante el monitoreo.

b) Concentración de sedimentos en suspensión

El método aplicado para obtener la relación entre la concentración de sedimentos en suspensión y el caudal del río fue el de “Curva de gasto”, realizada a partir de las 15 muestras realizadas durante las lluvias, obtenido la línea de tendencia potencial.

Figura 26: Concentración (mg/l) de sedimentos suspensión y caudales (l/s)



La Figura 26 muestra una tendencia creciente entre el caudal líquido y la concentración de sedimentos en suspensión en la quebrada Calispuquio. El ajuste de los datos experimentales mediante un modelo de potencia arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.76$, con los parámetros $c = 43.517$ y $m = 1.15$.

Las concentraciones obtenidas para el análisis de sedimentos en suspensión son menor a 0.20 lo cual indican un análisis de inundación de agua con carga suspendida convencional y carga de fondo (ver Tabla 7).

3.6.5. Volumen de sedimentos

Los volúmenes obtenidos en la trampa de sedimentos y fotogrametría nos brindaron información de campo con el fin de establecer que se asemeje a los resultados de las estimaciones obtenidas mediante fórmulas teóricas para el transporte de sedimentos de fondo.

a) Volumen de sedimentos acumulado

Para el análisis del volumen acumulado de sedimentos en la canalización aguas arriba del Jr Nicolas Arriola, donde se observó una variación significativa en las cotas de fondo, se utilizó el software Arc Gis para recortar las superficies generadas del 28 de octubre del 2023 y la superficie del 06 de enero del 2024 delimitando el área donde se aprecia la mayor acumulación. El software tiene la herramienta de Surface Difference, el cual permite calcular el volumen entre dos superficies (ver Figura 27) para lo cual se generaron dos superficies en formato TIN sin considerar los arbole en los márgenes.

Figura 27:Volumen de sedimentos acumulado en la canalización



En la Figura 27 se visualiza la distribución espacial del material acumulado en el tramo canalizado de la quebrada Calispuquio. El área donde se acumula la mayor cantidad de sedimentos abarca una superficie de 171 m2 donde se realizó el análisis de las superficies. Se obtuvo un volumen amulado de sedimentos de 18.97 m3 en la parte interna del canal.

Tabla 20. Volumen acumulado en la canalización

Fecha	Tiempo (días)	Vol. Acumulado (m3)
28 -10- 2023 al 03-12- 2023	36	11.55
28 -10- 2023 al	70	18.97

06-01-2024		
------------	--	--

Con el volumen acumulado en la canalización obtenemos el gasto sólido fondo promediando ambos valores utilizando la ecuación (23):

Tabla 21. Gasto sólido de fondo

Fecha	$g_B(m^3/s)$
$G_B(m^3/s)$	0.00000343

b) Volumen de sedimento medido en campo

La trampa de sedimentos se construyó el día 18 de febrero de 2024. A partir de esa fecha, la trampa se fue llenando con los sedimentos transportados por la corriente. El volumen máximo se alcanzó en un periodo de 6 días, culminando el 24 de febrero de 2024. Durante este lapso, se presentaron varios episodios de lluvia, los cuales fueron registrados en la estación meteorológica de la UNC, en Cajamarca. Las precipitaciones que contribuyeron para el llenado de la trampa oscilan entre 0.2 mm a 5.7 mm. Siendo el más significativo el que ocurrió el 22 de febrero cuando se registró 5.7 mm de lluvia durante 2 horas.

Al finalizar el periodo de 6 días, se midió el volumen total de sedimentos capturados dentro de la trampa, lo que permitió realizar el cálculo de gasto sólido en la trampa de un análisis detallado del transporte de sedimentos en la quebrada bajo condiciones de lluvias moderadas a intensas.

El gasto sólido calculado para un volumen de $1.9 m^3$ durante los 5187400 segundos de llenado es $0.0000036 m^3/s$.

c) Volumen en gabinete

El volumen de sedimentos en gabinete es obtenido mediante la formula N°(51) la cual considera el gasto sólido en m^3/s (ver Tabla 19), la duración de la tormenta obtenida en campo (ver Figura 17) para cada evento monitoreado. La porosidad (n) obtenida de la fórmula N°(52) válido para $4 \times 10^{-4} mm < D_{50} < 80 mm$, se obtiene un valor de $n = 0.319$.

Tabla 22. Volumen de sedimentos para los caudales monitoreados

Fecha	Meyer-Peter y Müller (m3)	Fórmula de Schoklitsch (m3)	Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (m3)	Mizuyama y Shimohigashi (m3)	Método de Mora, Aguirre Y Fuentes (m3)
19/03/2024	104.77	95.20	0.14	11.53	3.41

Fecha	Meyer-Peter y Müller (m3)	Fórmula de Schoklitsch (m3)	Fórmula de Parker, Klingeman y Mc Lean (m3)	Mizuyama y Shimohigashi (m3)	Método de Mora, Aguirre Y Fuentes (m3)
06/04/2024	45.57	47.12	0.05	5.92	2.21
07/04/2024	1.65	11.30	-	1.79	1.55
08/04/2024	67.29	70.03	0.12	8.56	2.73
11/04/2024	52.08	49.89	0.05	6.31	1.81
21/04/2024	1.18	4.82	-	0.90	-
28/04/2024	1.89	11.42	-	1.87	-
30/04/2024	5.06	3.88	-	0.66	-
04/05/2024	13.49	18.48	-	2.69	-
08/05/2024	0.83	2.56	-	0.54	-
27/05/2024	67.29	74.01	0.12	9.02	2.74

CAPÍTULO IV

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Parámetros geomorfológicos

La cuenca hidrográfica de la quebrada Calispuquio ha sido la delimitada teniendo como punto de salida la canalización aguas arriba del Jr. Nicolás Arriola, la cual presenta una superficie de 3.93 km², su perímetro es 11.23 km, con una pendiente media de 0.31m/m y la longitud del cauce principal es 5.09 km.

Como se muestran en la Tabla 23, la cuenca con E y C próximos a 0 indica que se trata de cuenca alargada y el Kc superior indica que es propensa a las crecientes. La densidad de drenaje es 2.06 siendo un valor aproximado para cuencas bien drenadas.

Tabla 23. Parámetros Geomorfológicos de la cuenca

Nombre del Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Elongación	E	0.44	S/N
Índice de Gravelius (Compacidad)	Kc	1.59	S/N
Circularidad	C	0.39	km
Densidad de Drenaje	Dd	2.06	u/km ²

Según la pendiente del cauce principal en el área de estudio es 0.09 m/m, ver Figura 21, presenta un flujo denominado torrente típico de los ríos de montaña (Morassutti, G. 2021). Los cuales presentan un gasto sólido de fondo mayor que los sólidos en suspensión mayor (López, R. 2005).

El área de estudio se localiza dentro de la carta geológica 15-F. En la zona alta predominan unidades de la Formación Centro Volcánico Rumiorco (Po-ru'3), caracterizadas por la presencia de rocas volcánicas altamente erosionables, lo que incrementa la susceptibilidad a procesos de remoción en masa, como deslizamientos y flujos de detritos. En contraste, la zona baja está compuesta por Depósitos Aluviales recientes (Qh-al), los cuales presentan una alta vulnerabilidad a inundaciones y a la acumulación de sedimentos durante eventos de precipitación intensa.

4.2. Caracterización de los sedimentos en el tramo de estudio

La Figura 23 muestra las curvas, a partir de las cuales se determinó que los sedimentos están compuestos principalmente por arenas gruesas y gravas. La curva promedio muestra que los sedimentos contienen un 49% de grava, 22% de arena gruesa y 29% de arena fina. Según la USCS, este material corresponde a un suelo tipo grava (G).

Se obtuvo un coeficiente de uniformidad $C_u=2.74$ y un coeficiente de curvatura $C_c=0.19$, valor que se encuentra fuera del rango $1 < C_c < 3$. De acuerdo con el USCS, la grava se clasifica como mal graduada (GP) (Tabla 3) (Macias, A. et al. 2020).

El diámetro medio de la muestra extraída en el tramo canalizado (M-1) es 8 mm, mientras que el diámetro efectivo ponderado es de 20.58 mm. Según la clasificación de partículas de la American Geophysical Union (A.G.U) (Tabla 1), este material corresponde a grava media. Denominadas partículas no cohesivas característicos de los cauces aluviales (Marcacuzco, J. 2017).

4.3. Aforo del cauce de la quebrada Calispuquio

Se realizó el monitoreo de 11 eventos de lluvia entre marzo y abril de 2024, registrando los caudales cada 5 minutos (ver Figura 17). Los eventos máximos aforados ocurrieron el 19/03/2024, 06/04/24, 08/04/2024 y el 27/05/2024, Con caudales pico de 261.3 l/s, 121.4 l/s, 198.8 l/s y 223.1 l/s respectivamente. Estos eventos corresponden a las precipitaciones máximas registradas en los meses de marzo, abril y mayo, según los datos de la estación UNC Cajamarca (ver Figura 46).

El caudal dominante obtenido fue de 106.6 l/s. En la Tabla 10 se presentan los caudales pico registrados para cada evento monitoreado, siendo los correspondientes a las fechas 19/03/2024, 06/04/2024, 08/04/2024 y 27/05/2024 superiores a dicho valor. Estos caudales representan crecidas anuales significativas, las cuales juegan un papel fundamental en la

formación del lecho del cauce, ya que marcan el umbral a partir del cual se inicia el transporte de sedimentos (Rocha, A. 1998).

4.4. Volumen de sedimentos de la quebrada Calispuquio

La estimación del volumen de sedimentos en campo de la quebrada Calispuquio se llevó a cabo utilizando la fotogrametría y trampa de sedimentos.

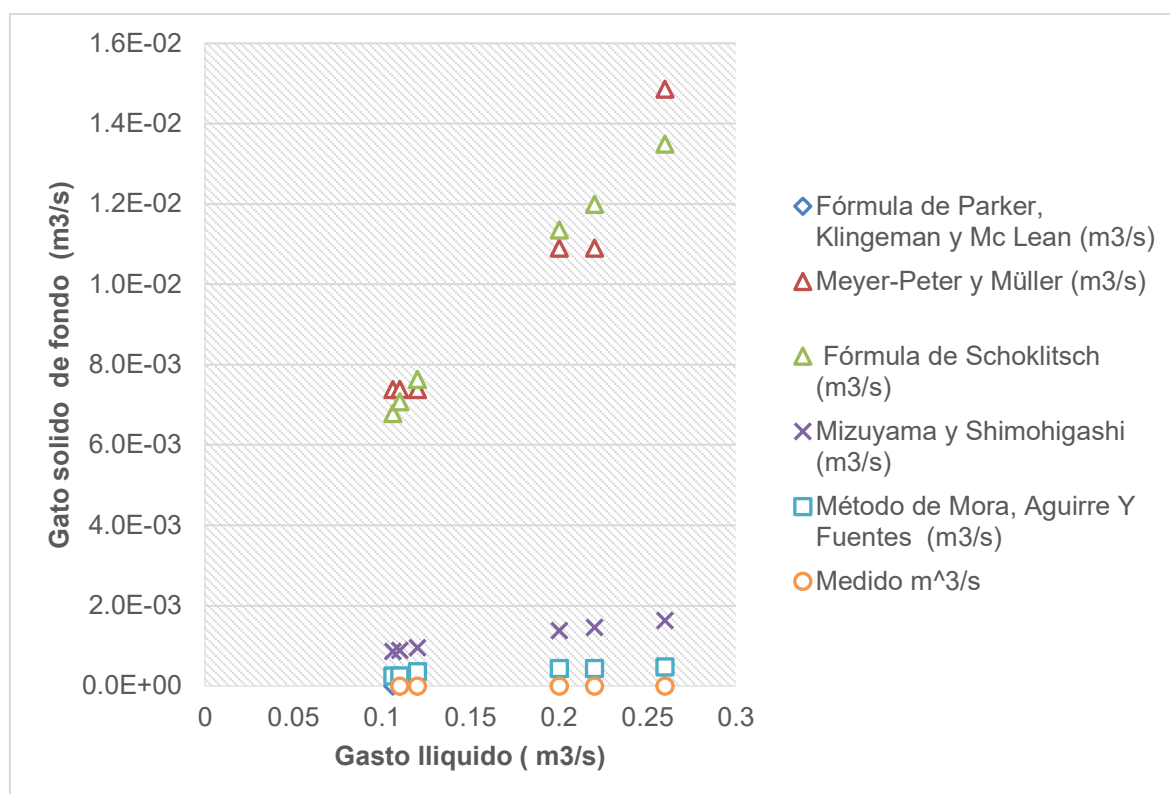
El método de fotogrametría se aplicó entre el 28 de octubre de 2023 y el 6 de enero de 2024 aguas arriba del Jr. Nicolás Arriola. Este procedimiento facilitó la estimación de un volumen total de sedimentos acumulados de 18.97 m³ en tramo canalizado ver figura 26.

Se realizó una trampa de sedimentos en el cauce que se llenó entre el 18 de febrero hasta el 24 de febrero de 2024. Durante este lapso, se presentaron varios episodios de lluvia los cuales no todos fueron de gran duración. La trampa alcanzó un volumen de 1.9 m³ de sedimentos acumulados, considerando eventos monitoreados y los registros de la estación UNC, el tiempo estimado de arrastre de sedimentos es 70 minutos aproximadamente.

4.5. Comparación de resultados de las fórmulas empíricas con muestras obtenidas en campo

En la Tabla 22 se presentaron los resultados de Las fórmulas de Meyer-Peter y Müller, Schoklitsch, Parker, Klingeman y McLean, Mizuyama y Shimohigashi, así como el método de Mora, Aguirre y Fuentes, aplicadas a las mediciones. Asimismo, se incluyó el gasto sólido de fondo obtenidos mediante fotogrametría de la Tabla 21 asociado a cada evento que ese por encima del caudal dominante para establecer una comparación. Estos resultados se resumen gráficamente en la.

Figura 28: Comparación de formulaciones teóricas.



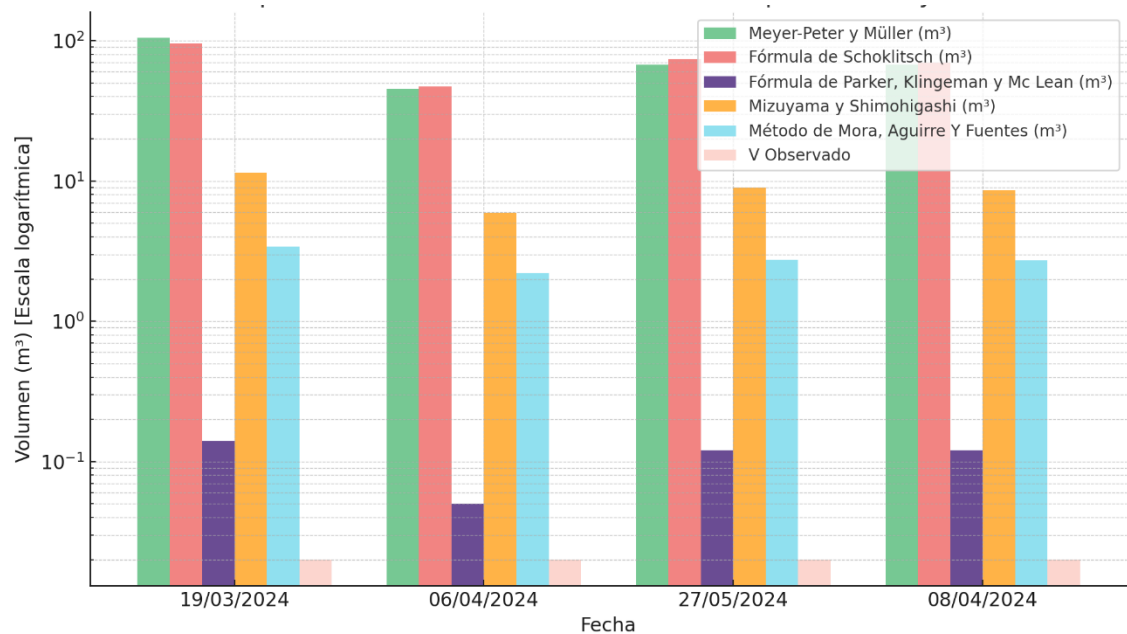
La Figura 28 muestra una comparación entre los resultados obtenidos mediante las fórmulas de Meyer-Peter y Müller, Schoklitsch, y Mizuyama y Shimohigashi tienden a sobreestimar los valores del gasto sólido de fondo, especialmente en eventos de mayor magnitud. En contraste, el método de Parker, Klingeman y McLean muestra estimaciones más ajustadas a los valores medidos, particularmente en eventos con caudales de menor intensidad.

Para el evento máximo registrado el 19 de marzo de 2024, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos por las distintas fórmulas evaluadas. La fórmula de Meyer-Peter y Müller mostró una sobreestimación significativa, calculando un valor 15.4 veces superior al medido en campo. De manera similar, la fórmula de Schoklitsch sobreestimó el gasto sólido observado en un factor de 14.76. En contraste, el método de Parker, Klingeman y McLean fue el que presentó la mejor aproximación, estimando un gasto sólido de fondo de $7.56 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, muy cercano al valor medido de $3.43 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

El método de Parker, Klingeman y McLean se acerca al valor observado, aunque con una sobreestimación de 2.2 veces. Las fórmulas de Meyer-Peter y Müller y de Schoklitsch fueron las que presentaron las mayores sobreestimaciones. De manera similar, los métodos de Mizuyama y Shimohigashi y de Mora, Aguirre y Fuentes también sobreestimaron los resultados, con factores de 251 y 75 veces, respectivamente.

Mediante la formula N°(51) se obtuvo los volúmenes para cada evento que supere el caudal dominante, se muestra que el volumen observado es menor en comparación con las estimaciones de todas las fórmulas, debido a las limitaciones en la captura de sedimentos reales y a la variabilidad de las condiciones hidráulicas durante los eventos monitoreados.

Figura 29: Comparación de volúmenes de sedimentos por método y fecha



En la Figura 29 se presentan los resultados que confirman que el método de Parker, Klingeman y McLean es el más adecuado para estimar los volúmenes de sedimentos en la quebrada Calispuquio, al mostrar un desempeño más cercano a los valores observados en campo.

4.6. Evaluación de la acumulación de sedimentos y residuos aguas arriba de la canalización del Jr. Nicolás Arriola.

se observó una variación significativa en las cotas de fondo. Este análisis se realizó mediante la utilización del software ArcGIS, utilizando la herramienta *Surface Difference*. Con esta herramienta se calcularon las diferencias de volumen entre las superficies generadas el 28 de octubre de 2023 y el 6 de enero de 2024, delimitando el área donde se registró la mayor acumulación de sedimentos. En Las superficies comparadas se excluyendo los árboles en los márgenes para evitar distorsiones en el análisis (ver Figura 26).

Figura 30: Variación de nivel en la canalización de la Calispuquio entre octubre y enero.



La Figura 30 evidencia los cambios en la elevación del fondo del canal en el tramo canalizado de la quebrada Calispuquio, registrados entre octubre de 2023 y enero de 2024. Debido a la topografía accidentada del área, se identificó una zona de acumulación de sedimentos de aproximadamente 171 metros de longitud, ubicada aguas arriba del Jr. Nicolás Arriola, cerca del inicio del tramo canalizado. En este sector, se observaron incrementos en la elevación del fondo del canal que oscilan entre 0.2 y 0.6 metros.

CAPÍTULO V

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se obtuvieron los parámetros geomorfológicos de la cuenca de la quebrada Calispuquio mediante el software ArcGIS. Los resultados muestran una superficie de 3.93 km², un perímetro de 11.23 km y una pendiente media de 0.31 m/m, lo que indica que se trata de una cuenca de alta montaña. Además, se obtuvo una densidad de drenaje de 2.06, lo cual indica que es una cuenca bien drenada. Los parámetros de forma señalan que es ligeramente alargada y propensa a crecidas.
- Los sedimentos del tramo de estudio se clasifican como grava mal graduada (GP) según el USCS ($C_u=2.74$ y $C_c=0.19$). El diámetro medio de la muestra en la canalización (M1) es de 8 mm, mientras que el diámetro efectivo promedio es 20.58 mm, clasificándose como grava media según la AGU. Este material corresponde a un suelo no cohesivo, característico de cauces aluviales.
- Se realizó el monitoreo de 11 eventos de lluvia en la quebrada Calispuquio durante marzo, abril y mayo de 2024, los caudales máximos aforados (261.3 l/s, 121.4 l/s, 198.8 l/s y 223.1 l/s) coinciden con las precipitaciones máximas registradas en los días 19/03/2024, 06/04/24, 08/04/2024 y el 27/05/2024.
- El volumen de sedimentos acumulados en la quebrada Calispuquio en el tramo canalizado es 18.97 m³ mediante fotogrametría en un lapso de 70 días y la trampa de sedimentos con un volumen de 1.9 m³ se llenó en un lapso de 6 días.
- Se compararon los resultados de las fórmulas empíricas Meyer-Peter y Müller, Schoklitsch, Parker, Klingeman y McLean, Mizuyama y Shimohigashi, así como el método de Mora, Aguirre y Fuentes, con los valores medidos en campo. Se encontró que las fórmulas de Meyer-Peter y Müller, Schoklitsch, y Mizuyama y Shimohigashi tienden a sobreestimar el gasto sólido de fondo. En contraste, el método de Parker, Klingeman y McLean fue el más cercano a los valores observados. Esto lo posiciona como el más adecuado para estimar el transporte de sedimentos en la quebrada Calispuquio.
- Se evaluó la acumulación de sedimentos y residuos en la canalización del Jr. Nicolás Arriola mediante análisis de diferencias de superficies generadas en ArcGIS entre

octubre de 2023 y enero de 2024. Los resultados muestran acumulaciones significativas en un área de 171 m² aguas arriba del canal, con incrementos en la elevación del fondo entre 0.2 y 0.6 m.

- El gasto sólido de fondo obtenido en campo es 0.00000343 m³/s.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que en futuros estudios se analicen de manera diferenciada los tramos canalizado y no canalizado de la quebrada Calispuquio, considerando las particularidades hidráulicas y geomorfológicas de cada sector. Esta separación permitirá identificar con mayor precisión los procesos de transporte y acumulación de sedimentos en cada tramo.
- Con base en los volúmenes acumulados, se recomienda planificar actividades regulares de limpieza y remoción de sedimentos en el canal para evitar obstrucciones que puedan generar desbordamientos en eventos de lluvia intensa.
- Identificar las zonas más vulnerables a la erosión, especialmente en la parte alta de la cuenca, y considerar la implementación de medidas de control, como reforestación o estabilización de taludes, para mitigar los deslizamientos y el aporte de sedimentos al cauce.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

Bibliografía

- Apaclla, N. R. (2014). Hidráulica fluvial (1.^a ed.). Editorial Q y P Impresores.
- Ayala, R. I., S., A., S., G., & Rodríguez Ramírez, K. (2023). Abanicos aluviales: Sitios peligrosamente seguros. Formas, procesos y evolución (1.^a ed.). Universidad de Los Andes. ISBN 978-980-11-2009-4.
- Basile, P. A. (2018). Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales (1.^a ed.). Editorial de la Universidad Nacional de Rosario.
- Chow, V. T. (1959). Open-channel flow (1.^a ed.). McGraw-Hill.
- Engelund, F., & Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams (1.^a ed.). Technical University of Denmark.
- Flores, M. G., & Álvarez, J. A. M. (1996). Transporte de sedimentos (1.^a ed.). Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez, A. M., & Besteiro, S. I. (2010). Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas (1.^a ed.). Universidad Nacional de La Plata.
- Hudson, N. W. (1997). Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía (Vol. 68, 2.^a ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Julien, P. Y. (2010). Erosion and sedimentation (2.^a ed.). Cambridge University Press.
- Komura, S. (1961). Bulk properties of river bed sediments. Proceedings of the 11th Japan National Congress of Applied Mechanics, 153–158. Japan Society of Mechanical Engineers.
- Leliavsky, S. (1955). Introduction to fluvial hydraulics (1.^a ed.). Dover Publications.
- López, R. F. P., & Patrón, E. R. (2013). Cuencas hidrográficas: Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión (1.^a ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Macías Lóor, A. O., Carvajal Rivadeneira, D. D., Cobos Lucio, D. A., Fienco Sánchez, B. E., Peralta Delgado, J. A., & Zambrano Acosta, J. M. (2020). Mecánica de suelos (1.^a ed.). Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L.
- Marcacuzco, J. A. M. (2017). Transporte de sedimentos en ríos aluviales (1.^a ed.). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Marín, M. (2008). Suficiencia investigadora. Programa de doctorado: Minería, medio ambiente y desarrollo sostenible (1.^a ed.). Universidad Politécnica de Cartagena.
- MINAM. (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias. El Peru, 7, 10–19.
- Morassutti, G. F. (2021). Diseño de estructuras de corrección de torrentes y retención de sedimentos (1.^a ed.). Ediciones de la U.

- O'Brien, J. S. (2003). FLO-2D users' manual version 2003.06, July 2003. FLO-2D Software Inc.
- Ongley, E. D. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos (Estudio FAO Riego y Drenaje – 55, 1.^a ed.). GEMS/Water Collaborating Centre, Canada Centre for Inland Waters, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Ordoñez, J. J. (2019). Movimiento en masa por lluvias intensas en el Perú (1.^a ed.). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Dirección de Hidrología (DHI).
- Ramírez, R. (2021). Transporte de sedimentos con Python (1.^a ed.). Editorial Ramírez Quispe.
- Rocha, A. (1998). Introducción a la hidráulica fluvial (1.^a ed.). Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.
- Vide, J. P. M. (2003). Ingeniería de ríos (Vol. 1, 1.^a ed.). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Villalaz, C. C. (2007). Mecánica de suelos y cimentaciones (3.^a ed.). Editorial Limusa.
- Villalobos, F. (2016). Mecánica de suelos (2.^a ed.). Ediciones UCSC.
- World Meteorological Organization (WMO). (2012). International glossary of hydrology (3rd ed.). WMO, No. 385. World Meteorological Organization.

Linkografía

- Aguirre, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Virtual REDESMA*, 5, 9–20. http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1995-10782011000100003&nrm=iso
- Aguirre-Pe, J., Olivero, M., & Moncada, A. (2000). Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. *Ingeniería del agua*, 7(4), 353–365. <http://dx.doi.org/10.4995/ia.2000.2851>
- Andrango, C. S., & Piedra, J. A. (2014). *Bases para el dimensionamiento de obras de control de torrentes*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7246>
- Arboleda, J., Felipe, O., & Yerrén, J. (2018). *Manual de hidrometría*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/264>
- Asensio, S., Moreno, H., & Blanquer, G. (2006). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. <https://riunet.upv.es/bitstreams/d32c8f53-5d5f-417a-8764-e33fa24f3f47/download>
- Barbosa, S. G. (2013). *Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de gravas)*. Universidad Nacional de Colombia. <https://core.ac.uk/download/pdf/427693413.pdf>

- Basile, P., Riccardi, G., & Rodríguez, J. (2016). Modelación matemática hidromorfodinámica a escala de cuenca en ríos con lechos de sedimentos no-uniformes. *Cuadernos Del CURIHAM*, 22, 1–25. <https://doi.org/10.35305/curiham.v22i0.24>
- Bathurst, J. C., Bovolo, C. I., & Cisneros, F. (2010). Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale. *Ecological Engineering*, 36(3), 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.05.001>
- Bravo-Espinosa, M., Osterkamp, W. R., & Lopes, V. L. (2004). Transporte de sedimentos en corrientes naturales: Revisión técnica de ecuaciones empíricas. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 377–386. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:82510742>
- Chamorro, G. (2011). *Guía de hidrometría: Estimación del caudal por el método de flotadores*. SENAMHI. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/3296>
- Chapoñan, K. J. (2023). Evaluación comparativa del transporte de sedimentos de fondo en el río Tumbes durante El Niño Costero y La Niña Costera: 2017–2018 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/19920>
- Fernández Morales, F. H., & Duarte, J. E. (2012). Desarrollo de un caudalímetro digital para la medición de caudal en ríos. *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación*, 3(1), 44–51. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/investigacion_duitama/article/view/2130
- Franco, F. L. (2013). *Presiones, impactos y efectos antrópicos sobre los ríos*. Instituto de Estudios Ambientales (IDEA). https://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines_ambientales/boletin115.pdf
- García, C., & Sala, M. (1998). Aplicación de fórmulas de transporte de fondo a un río de gravas. *Ingeniería del agua*, 5(1), 59–72. <https://doi.org/10.4995/ia.1998.2744>
- Gualpá, M., Céleri, R., & Crespo, P. (2022). Efecto del coeficiente teórico de descarga de vertederos sobre la medición de caudales en pequeños ríos andinos. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 36(2), 75–87. <https://lagranja.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/3934>
- Huang, C.-h., Wells, L., & Norton, L. (1999). Sediment transport capacity and erosion processes: Model concepts and reality. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(6), 503–516. https://www.researchgate.net/publication/282433176_The_Concept_of_Transport_Capacity_in_Geomorphology
- INGEMMET. (2020). *Evaluación de peligros geológicos en la quebrada Calispuquio. Distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, región Cajamarca*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3065>
- INGEMMET. (2020). *Evaluación de peligros geológicos en la quebrada Calispuquio* (Informe Técnico A7105). Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGENMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/4583>

- Janampa Arca, J. (2016). Análisis y evaluación comparativa experimental y teórica del gasto sólido de fondo y suspensión en el río Sondondo, Sucre–Ayacucho–2016. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3708>
- Juan, E., Benítez, M., Luis, I., & Cornejo, A. (2014). *Manual N.º 5: Medición de agua*. Ministerio de Agricultura y Riego. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4291>
- Lane, S. N., Westaway, R. M., & Murray Hicks, D. (2003). Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3), 249–271. <https://doi.org/10.1002/esp.483>
- Lei, T., Zhang, Q., Zhao, J., & Tang, Z. (2001). A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1537. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.7037>
- León, K. (2015). Patrones diarios de precipitación y su relación con la circulación atmosférica durante eventos extremos El Niño en la costa norte peruana. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5056>
- López, R. (1969). Métodos para la determinación del sedimento suspendido y arrastrado por el fondo en los ríos [Tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador]. <https://hdl.handle.net/20.500.14492/16517>
- López, R. (2005). Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (III). <http://hdl.handle.net/10459.1/46509>
- López Alonso, R. (2003). *Fórmulas para el cálculo aproximado de la capacidad de transporte de sedimentos en ríos de montaña*. Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas (Madrid). <https://core.ac.uk/download/70289680.pdf>
- Menchú, S. D. (2016). Calibración de vertederos rectangulares de pared delgada con dos contracciones y de ancho variable [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/5914>
- Morera, S. B., Condom, T., Crave, A., Steer, P., & Guyot, J. L. (2017). The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012). *Scientific Reports*, 7(1), 11947. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12220-x>
- Pacheco, E. A., & Carrillo, V. M. (2016). Transporte de fondo potencial mediante estudio en modelo físico de lecho móvil. *Maskana*, 5, 73–81. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/555>
- Peltre, P. (1989). Quebradas y riesgos naturales en Quito, periodo 1900–1988. En P. Peltre (Ed.), *Riesgos naturales en Quito: Lahares, aluviones y derrumbes del Pichincha y del Cotopaxi* (pp. 45–90). Corporación Editora Nacional; Colegio de Geógrafos del Ecuador. (Estudios de Geografía; 2). <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:31649>

- Ponce, V. M. (1988). *Ultimate sediment concentration* [Versión en línea 2018]. San Diego State University. https://ponce.sdsu.edu/ultimate_sediment_concentration.html
- Qu, L., Lei, T., Zhou, C., & Yang, X. (2023). Measuring sediment transport capacity of concentrated flow with erosion feeding method. *Land*, 12(2), 411. <https://doi.org/10.3390/land12020411>
- Rodríguez, H. A. (2010). *Hidráulica fluvial. Fundamentos y aplicaciones*. Socavación. Escuela Colombiana de Ingeniería. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1728>
- Rosas, M. A., Clapuyt, F., Viveen, W., & Vanacker, V. (2023). Quantifying geomorphic change in Andean river valleys using UAV-PPK-SfM techniques. *Geomorphology*, 435, 108766. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108766>
- Rudas, J. L. (2022). *Gasto sólido de fondo aguas arriba de la captación Río Porcón–Cajamarca 2020* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/5271/RUDAS%20CHU%20NQUI%20JACKELINE%20LILIANA.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Sajinkumar, K. S., & Oommen, T. (2018). Photogrammetry. En P. T. Bobrowsky & B. Marker (Eds.), *Encyclopedia of Engineering Geology* (pp. 713–714). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_221
- SEDACAJ. (2022). *Plan de contingencia de la localidad de Cajamarca – EPS SEDACAJ S.A. Ante el escenario de lluvias intensas – 2023*. División MRSE y GRD, Gerencia de Ingeniería Cajamarca. <https://www.sedacaj.com.pe/docs/plan-conting-cajamarca-lluvias-2023.pdf>
- Trigoso, B. G. (2018). *Modelamiento hidráulico de la quebrada Calispuquio* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. <https://hdl.handle.net/20.500.14074/2051>
- Valdivia, R. B. (2018). *Transporte de sedimentos de fondo y volumen generado aguas arriba de la captación del Chicche–Cajamarca 2016* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/2051>
- Vázquez, D. (2013). Transporte de sedimentos como carga de fondo en la cuenca del río Narcea (vertiente norte de la Cordillera Cantábrica). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.18973.56809>
- Zwoliński, Z. (1993). Dynamics of bed load transport in the Parsęta River channel, Poland. En M. A. Marzo & C. Puigdefábregas (Eds.), *Alluvial Sedimentation* (pp. 77–87). https://www.researchgate.net/publication/235687329_Dynamics_of_bed_load_transport_in_the_Parseta_River_channel_Poland

ANEXO 1: PANEL FOTOGRAFICO



Figura 31: Colocación de Puntos de Control para fotogrametría



Figura 32: Primer levantamiento fotogramétrico para caracterizar el cauce

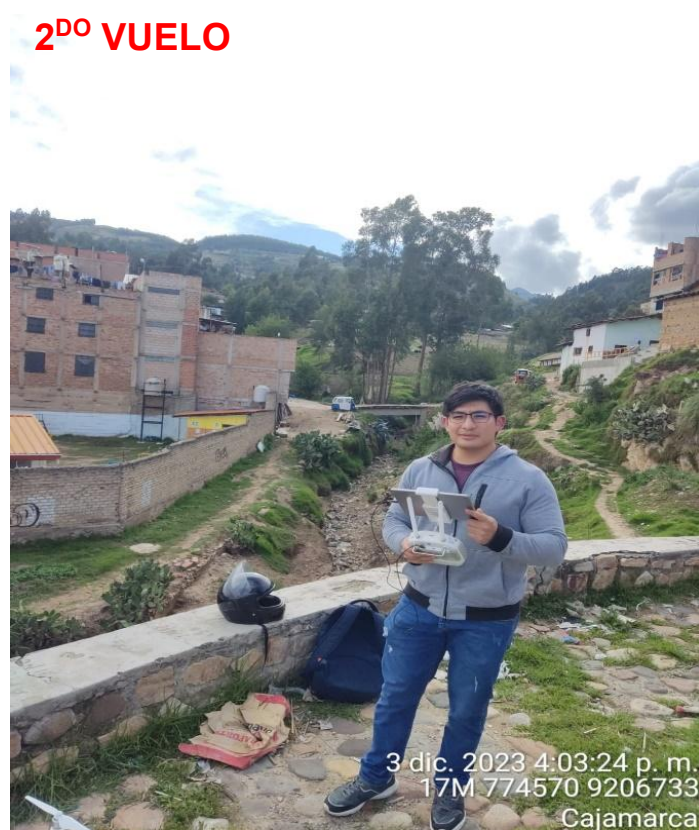


Figura 33: segundo levantamiento fotogramétrico con dron

3er VUELO

Figura 34: tercer levantamiento fotogramétrico con dron



Figura 35: Inspección de la parte baja del tramo de estudio de la quebrada Calispuquio



Figura 36: Inspección de la limpieza de la canalización quebrada Calispuquio aguas arriba del Jr. Nicolás Arriola en marzo del 2023



Figura 37: Extracción de las muestras para la granulometría del material subsuperficial



Figura 38: Elaboración de la trampa de sedimentos en el cauce.



Figura 39: Instalación del vertedero



Figura 40: Instalación de reglas limnimetricas



Figura 41: Toma de secciones del cauce para el método del flotador



Figura 42: Realización del tamizado para la Elaboración de la curva granulométrica



Figura 43: Peso de las muestras en suspensión



Figura 44: Toma de datos del laboratorio para el gasto sólido en suspensión

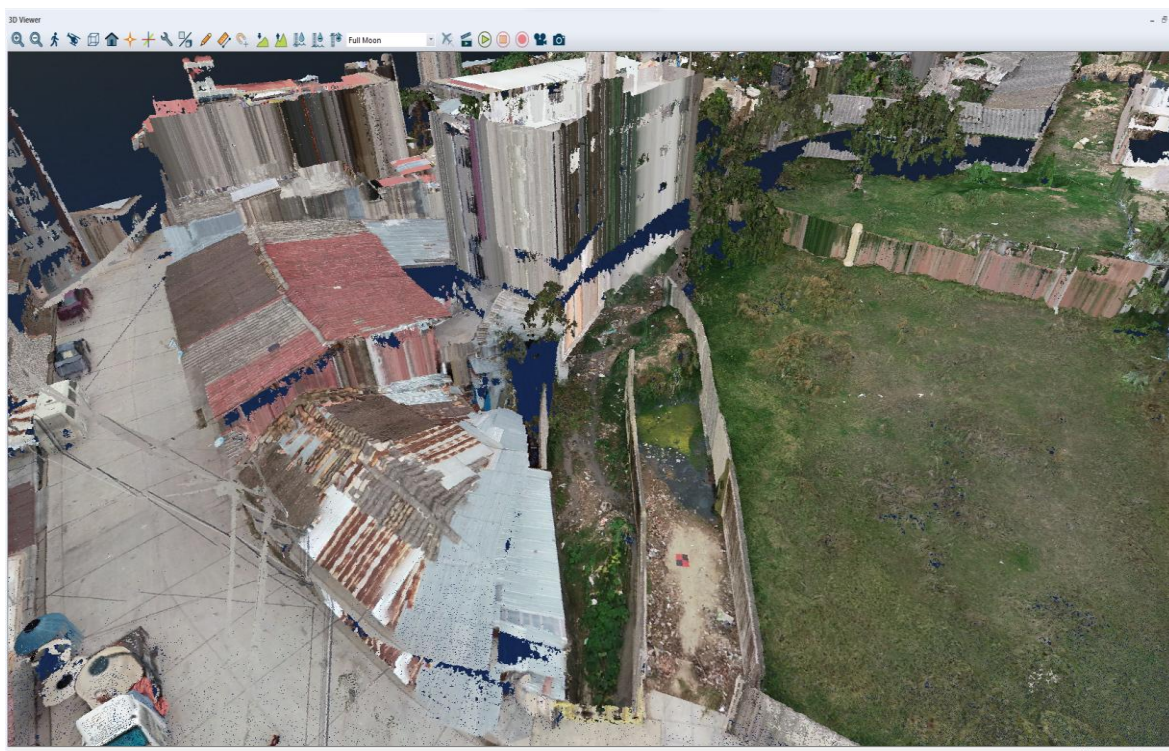


Figura 45: Vista de la superficie generada en Global Mapper

ANEXO 2. RESULTADOS DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA				LAB-01	
CAPTURA DE SÓLIDOS					
Bach. Terrones Estrada, Jhonatan Elias					
Ensayo de análisis de variables: Determinación de sólidos suspendidos totales SST					
N°	código interno	Volumen de muestra (ml)	Peso de filtro (g)	peso de filtro + residuo seco 105°C	Concentración (mg/l)
			W1	w2	
1	110401	475.1	0.883	1.092	439.91
2	110402	460.0	0.817	1.077	565.22
3	110403	500.0	0.925	1.079	308.00
4	110404	490.0	0.845	1.032	381.63
5	280401	405.0	0.792	1.076	701.23
6	210401	100.0	0.873	0.922	490.00
7	280402	530.0	0.839	0.995	294.34
8	280403	100.0	0.854	0.892	380.00
9	280404	100.0	0.764	0.796	320.00
10	280405	200.0	0.825	0.89	325.00
11	280406	215.0	0.856	0.922	306.98
12	505011	100.0	0.85	1.006	1560.00
13	505012	470.0	0.761	3.571	5978.72

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA					LAB-01
CAPTURA DE SÓLIDOS					
Bach. Terrones Estrada, Jhonatan Elias					
14	505021	100.0	0.831	0.909	780.00
15	505022	350.0	0.808	1.602	2268.57

ANEXO 3. DATOS HIDROLOGICOS

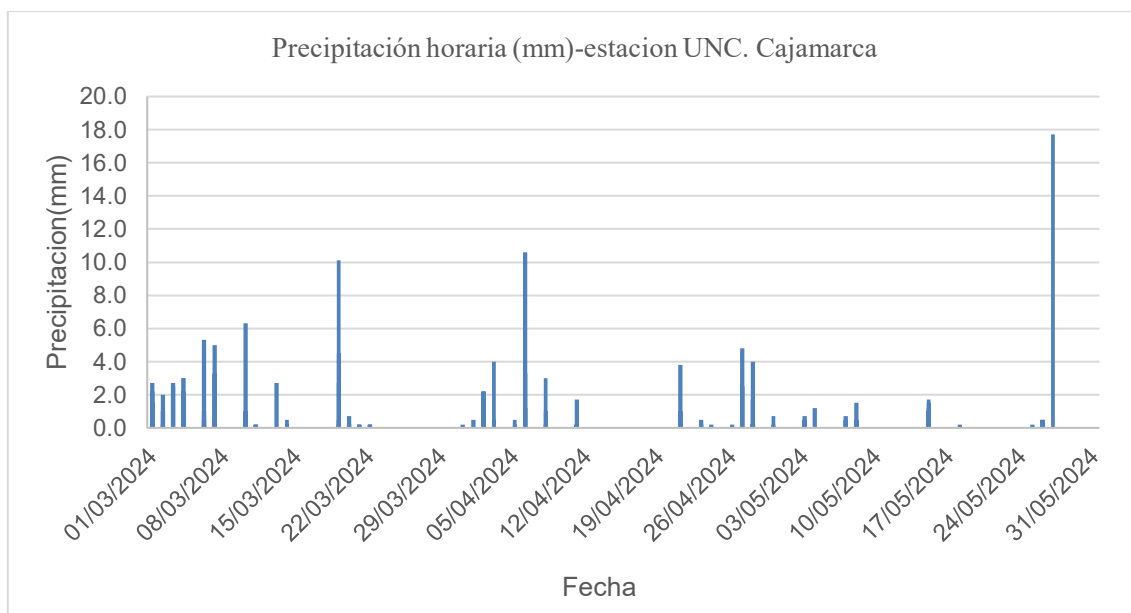


Figura 46: Datos de precipitación horaria en la estación UNC -CAJAMARCA

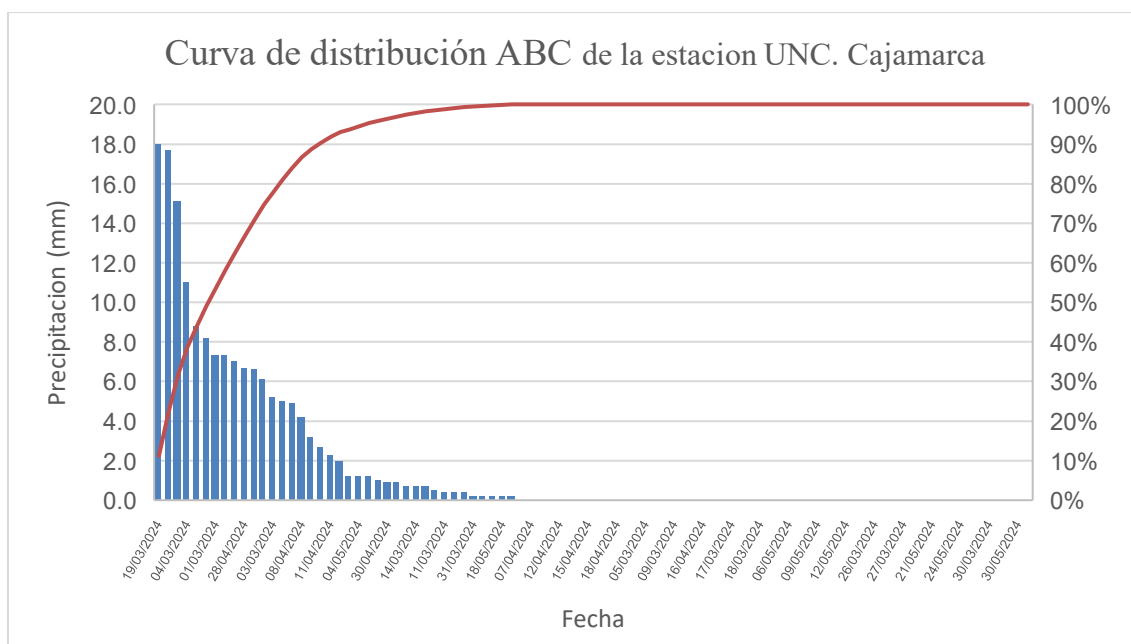


Figura 47: Curva de distribución de precipitación de la estación UNC -CAJAMARCA

	Caudal por vertedero l/S									Cresta aguda			
	L=	0.6								Cd	2.65		
	caudal monitoreado Tiempo en minutos									#.C	2		
Día/mes/año	5	10	15	20	25	30	35	50	55	60	70	80	90
19/03/2024	4.5	36.0	121.4	261.3	66.1	50.3	36.0	32.7	23.4	20.5	12.7	8.3	4.5
06/04/2024	4.5	17.8	92.4	121.4	92.4	66.1	50.3	39.4	19.4	17.8	14.2	4.5	4.5
07/04/2024	4.5	7.4	10.4	17.8	15.2	23.4	14.2	10.4	10.9	8.3	8.3	4.5	4.5
08/04/2024	4.5	17.8	66.1	198.8	92.4	50.3	26.3	36.0	23.4	17.8	17.8	4.5	4.5
11/04/2024	8.3	12.7	15.2	26.3	15.2	20.5	12.7	8.3	6.3	4.5	8.3	8.3	4.5
21/04/2024	4.5	8.3	8.3	10.9	10.4	8.7	6.3	6.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
28/04/2024	4.5	9.1	9.5	10.4	15.2	17.8	12.7	10.0	8.3	7.4	6.7	5.9	4.5
30/04/2024	4.5	4.5	15.2	20.5	12.7	8.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
04/05/2024	4.5	17.8	23.4	39.4	32.7	20.5	17.8	15.2	12.7	11.8	7.4	6.3	4.5
08/05/2024	4.5	6.3	7.1	8.3	10.4	11.3	8.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
27/05/2024	4.5	36.0	92.4	223.1	142.2	66.1	36.0	28.2	17.8	15.2	12.7	4.5	4.5

Figura 48: Datos de aforos en el vertedero

ANEXO 4. ANALIS GRANULOMETRICO