

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Caracterización del régimen hidrológico mediante velocimetría de
imágenes de partículas en ríos de alta montaña: caso río
Luricocha, Ayacucho, 2024**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:
Bach. Vladimir CARDENAS GOMEZ

ASESOR:
M.Sc. César Vidal GUTIÉRREZ NINAHUAMÁN

COASESOR:
Ing. Kithner Alfonso ESPINOZA VARILLAS

AYACUCHO - PERÚ

2025

DEDICATORIA

Esta tesis es el resultado de muchas horas de trabajo, pero también del respaldo de quienes siempre han creído en mí. A todos ellos, con todo mi cariño y gratitud.

Con aprecio, Vladimir.

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, a la facultad de Ciencias Agrarias y a mi querida Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y ciudadano.

Al Instituto Geofísico del Perú (IGP), por su compromiso en la formación de jóvenes investigadores, contribuyendo al desarrollo de la ciencia y a la solución de problemáticas nacionales.

Al Programa Presupuestal 0089 “Reducción de la degradación de los suelos agrarios”, por su apoyo financiero en la obtención y procesamiento de información necesaria para la elaboración de la presente investigación científica.

Expreso también mi reconocimiento al Dr. Sergio Morera por sus cátedras en hidrometría de alta montaña y las capacitaciones en investigación científica, las cuales han sido clave en mi desarrollo académico.

A mi asesor de tesis el M.Sc. Ing. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán, por la orientación y apoyo académico, que me brindo para poder realizar el presente trabajo.

Al Ing. Kitnher Espinoza, mi coasesor, por su dedicación en la supervisión de este proyecto y su orientación en las actividades de campo y gabinete, esenciales para el desarrollo de esta investigación.

A los miembros del jurado de tesis al Dr. Eleazar Chuchón Angulo e Ing. Herbert Núñez Alfaro y al presidente de la comisión el Ing. Efraín Chuchón Prado por los comentarios y sugerencias a la presente investigación.

A mis amigos, compañeros y colegas que compartieron mi entusiasmo en la ejecución y culminación de la tesis. De manera muy especial al equipo de hidrometría del IGP-2024.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
ACRÓNIMOS	xiii
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	18
1.1. Antecedentes	18
1.1.1. Internacional	18
1.1.2. Nacional	19
1.1.3. Velocimetría por imágenes de partículas (PIV)	19
1.1.4. Principio de funcionamiento	20
1.1.5. Aplicaciones en la Ingeniería y la Ciencia	20
1.1.6. Ventajas y Precisión	20
1.1.7. Evolución y Nuevas tendencias	20
1.1.8. Hidrometría	21
1.1.9. Estación hidrometría	21
1.1.10. Sección de aforo o ce control hidrométrico	21
1.1.11. Caudal	22
1.1.12. Aforo	22
1.1.13. Velocidad	23

1.1.14. Batimetría	23
1.1.15. Mediciones del nivel de agua	23
1.1.16. Sensores levellogger y barologger.....	24
1.1.17. Medición del caudal por el método del correntómetro.....	25
1.1.17.1. Métodos y procedimientos de la medición de la velocidad media en vertical .	26
1.1.17.2 Método de un punto.....	27
1.1.17.3. Método de dos puntos.....	28
1.1.17.4. Método de tres puntos.....	28
1.1.17.5. Método de cinco puntos.....	29
1.1.17.6. Procedimiento del cálculo del caudal	29
1.1.18. Medición del caudal por el método del flotador.....	29
1.1.18.1. Determinación del área de la sección transversal	31
1.1.18.2. Procedimiento del cálculo del caudal	32
1.1.19. Medición del caudal por el método de dilución	32
1.1.19.1. Selección de sitio de aforo.....	32
1.1.19.2. Trazadores o equipos de detección.....	33
1.1.19.3. Cálculo del caudal	33
1.1.20. Selección de punto de control.....	33
1.1.21. Curva de gasto	34
1.1.22. Métodos estadísticos de validación de resultados	34
1.1.23. Incertidumbre durante crecidas	36
1.1.24. Implicaciones en la extrapolación de la curva de gasto	36
1.1.25. Incertidumbre temporal de las descargas de curvas de gasto	36
1.1.26. Evaluación de la incertidumbre global	37
1.1.26.1. Evaluación de la incertidumbre de las mediciones de descarga (ϵ_1).....	37

1.1.26.2. Evaluación de la incertidumbre de descarga en las curvas de clasificación de caudal por etapas (ϵ_2).....	38
1.1.27. Software Hydraccess	38
1.1.28. Software RIVeR	39
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	40
2.1 Ubicación del estudio	40
2.2 Población, muestra y muestreo	41
2.2.1 Población	41
2.2.2 Muestra	41
2.2.3 Muestreo	41
2.3 Materiales y equipos.....	42
2.4 Metodología.....	42
2.4.1 Trabajo de campo	43
2.4.1.1 Reconocimiento de campo.....	43
2.4.1.2 Instalación de sensores de nivel de agua	44
2.4.1.3 Aforos con correntómetro.....	45
2.4.1.4 Aforo con flotador	47
2.4.1.5 Aforo con trazador químico o dilución.....	48
2.4.1.6 Aforo con video-cámara	51
2.4.1.7 Descarga de datos de la estación hidrométrica.....	53
2.4.2 Trabajo de gabinete	54
2.4.2.1 Análisis y tratamiento de la data bruta descargada de la estación hidrométrica. 54	
2.4.2.2 Aforos con correntómetro.....	55
2.4.2.3 Aforos con flotador.....	55
2.4.2.4 Aforo con trazador químico o dilución.....	57
2.4.2.5 Aforo con video-cámara	60

2.4.2.6 Procesamiento y análisis de la información hidrológica con Hydraccess	66
2.4.3 Análisis y evaluación de incertidumbre global.....	69
2.4.3.1 Evaluación de la incertidumbre de las mediciones de descarga	69
2.4.3.2 Evaluación de la incertidumbre de descarga en las curvas de clasificación de caudal por etapas.	70
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIONES	71
3.1. Análisis de serie temporal de niveles de agua	71
3.2. Estimación de aforos	72
3.2.1. Aforos con correntómetro.....	72
3.2.1.1. Análisis de las isotacas de los aforos con correntómetro	75
3.2.2. Aforos con videocámara.....	76
3.2.2.1. Análisis de los vectores de velocidades superficiales en distintos regímenes hidrológicos.	77
3.2.3. Aforos con trazador químico	82
3.2.4. Aforos con flotador.....	85
3.3. Generación de familia de curvas	89
3.4. Estimación de incertidumbre entre las metodologías empleadas	90
3.5. Validación de los resultados	95
3.6. Serie de caudales.....	100
CONCLUSIONES.....	101
RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	104
ANEXOS	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Perfil de velocidades en corrientes naturales	23
Figura 1.2 Reglas Limnimétricas instaladas en cursos de agua	24
Figura 2.1 Área de influencia al punto de aforo.....	40
Figura 2.2 Instalación de los sensores de nivel de agua	44
Figura 2.3 Estación hidrométrica de Luricocha.....	45
Figura 2.4 Establecimiento del punto de aforo.....	46
Figura 2.5 Medición de los tirantes en la sección control.	46
Figura 2.6 Aforo con correntómetro estación Luricocha	47
Figura 2.7 Medición de las profundadas a lo largo del ancho del río.	48
Figura 2.8 Registro del tiempo recorrido por el flotador.....	48
Figura 2.9 Medición de los 5 gramos de sal para la calibración del río.	49
Figura 2.10 Calibración del río.....	50
Figura 2.11 Preparación de la solución de 20 litros de agua y 4 kilogramos de la sal común.....	50
Figura 2.12 Medición de la conductividad en el punto de aforo.	51
Figura 2.13 Puntos de control para la orto rectificación.....	52
Figura 2.14 Medición de los puntos de control.	52
Figura 2.15 Grabación del video.....	53
Figura 2.16 Retiro de los sensores para la descarga de datos.....	53
Figura 2.17 Descarga de datos de Levelogger y Barologger.....	54
Figura 2.18 Importación de datos calibración al software SolutionNaCl.	58
Figura 2.19 Importación de datos de aforo al software SolutionNaCl.	59
Figura 2.20 Generación del caudal en el software SolutionNaCl.	59
Figura 2.21 Extracción de las imágenes a partir del video generado en campo.	60
Figura 2.22 Demarcación del área del interés en las imágenes	61

Figura 2.23 Selección de mascara en el área de interés	61
Figura 2.24 Generación de los vectores de velocidad.....	62
Figura 2.25 Selección del área densa con la nube de puntos de vectores.....	62
Figura 2.26 Resultado del procesamiento con PIVlab	63
Figura 2.27 Guardado del resultado del procesamiento con PIVlab.....	63
Figura 2.28 Importación del archivo resultado del PIVlab.....	64
Figura 2.29 Importación de la imagen donde se va trazar los puntos de control	64
Figura 2.30 Ubicación de los puntos de control e importación de las medidas.....	65
Figura 2.31 Seleccionado del área de interés.....	65
Figura 2.32 Generación de los vectores resultantes.....	66
Figura 2.33 Configuración del Hydraccess para correntómetro electromagnético	67
Figura 2.34 Curva de gasto para el método correntómetro	67
Figura 2.35 Registro de cotas para la generación de caudales	68
Figura 2.36 Generación de serie de caudales	69
Figura 3.1 Serie temporal de niveles de agua	71
Figura 3.2 Diagrama de dispersión de aforos con correntómetro	72
Figura 3.3 Intervalo de predicción al 95% del método de correntómetro	73
Figura 3.4 Curva gasto líquido de método del correntómetro	74
Figura 3.5 Análisis de las isotacas en caudales bajos.....	75
Figura 3.6 Análisis de las isotacas en caudales medios	75
Figura 3.7 Análisis de las isotacas en caudales altos.....	76
Figura 3.8 Diagrama de dispersión de aforos con video-cámara.....	76
Figura 3.9 Vectores de velocidad superficial en caudales bajos.....	77
Figura 3.10 Vectores de velocidad superficial en caudales medios	78
Figura 3.11 Vectores de velocidad superficial en caudales altos.....	79
Figura 3.12 Intervalo de predicción al 95% de método Videocámara.....	80

Figura 3.13 <i>Curva gasto líquido de método de videocámara</i>	81
Figura 3.14 <i>Diagrama de dispersión de aforos con trazador químico</i>	82
Figura 3.15 <i>Intervalo de predicción al 95% de método trazador químico</i>	83
Figura 3.16 <i>Curva gasto líquido de método de trazador químico</i>	84
Figura 3.17 <i>Diagrama de dispersión de aforos con flotador</i>	85
Figura 3.18 <i>Intervalo de predicción al 95% del método flotador</i>	86
Figura 3.19 <i>Intervalo de predicción al 95% del método flotador</i>	87
Figura 3.20 <i>Diagrama de dispersión de las distintas metodologías de aforo</i>	88
Figura 3.21 <i>Familias de curva altura gasto generadas en Hydraccess</i>	90
Figura 3.22 <i>Comparación de las metodologías según la clasificación de Tomkins, 2014</i>	90
Figura 3.23 <i>Comparación entre el método correntómetro y videocámara</i>	91
Figura 3.24 <i>Comparación entre el método del correntómetro y trazador químico</i>	92
Figura 3.25 <i>Comparación entre el método del correntómetro y flotador</i>	93
Figura 3.26 <i>Incertidumbre en la estimación del caudal</i>	94
Figura 3.27 <i>Correlación de caudal observado con correntómetro vs el caudal del modelo</i>	95
Figura 3.28 <i>Correlación de caudal observado con videocámara vs el caudal del modelo</i>	96
Figura 3.29 <i>Correlación de caudal observado con dilución vs el caudal del modelo</i>	96
Figura 3.30 <i>Correlación de caudal observado con Flotador vs el caudal del modelo</i> . ..	97
Figura 3.31 <i>Correlación de caudal observado vs el caudal del modelo</i>	98
Figura 3.32 <i>Clasificación de las metodologías en la estación de Luricocha</i>	99
Figura 3.33 <i>Serie de caudales finales</i>	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 <i>Relación entre el ancho y los puntos de medición de la velocidad</i>	25
Tabla 1.2 <i>Relación entre el ancho superficial del río y el número de verticales para la medición de la velocidad</i>	26
Tabla 1.3 <i>Método de los puntos reducidos</i>	27
Tabla 1.4 <i>Relación entre el ancho superficial del río y la cantidad de flotadores a emplear</i>	30
Tabla 1.5 <i>Indicadores estadísticos utilizando para la comparación de los métodos.</i>	35
Tabla 1.6 <i>Criterio de interpretación de índice de fiabilidad</i>	36
Tabla 2.1 <i>Ordenado de Datos de Calibración</i>	57
Tabla 2.2 <i>Ordenado de Datos de Aforo</i>	58
Tabla 2.3 <i>Error por el número de verticales medidos</i>	69
Tabla 2.4 <i>Error debido a la cantidad de verticales</i>	70
Tabla 3.1 <i>Parámetros estadísticos para ICCOR</i>	73
Tabla 3.2 <i>Parámetros y Estadísticos para ICVID</i>	80
Tabla 3.3 <i>Parámetros y Estadísticos para ICDIL</i>	83
Tabla 3.4 <i>Parámetros y Estadísticos para ICFLO</i>	86
Tabla 3.5 <i>Valores de caudales mínimos y máximos obtenidos por captor en la estación Luricocha</i>	89

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 01. Colaboradores de la investigación	108
Anexo 02. Panel fotográfico del trabajo del campo	109
Anexo 03. Mapa de ubicación	116
Anexo 04. Especificaciones técnicas de los equipos empleados.....	117

ACRÓNIMOS

PIV: Particule Image Velocimetry (Velocimetría de imágenes de partículas)

LSPIV: Large scale particule image velocimetry (velocimetría de imágenes de partículas a gran escala)

UAV: Unmanned aerial vehicle (vehículos aéreos no tripulados)

RIVeR: Rectification of imagen velocity results (rectificación de los resultados de velocidad de la imagen)

PIVLab: Laboratory particule image velocimetry (Velocimetría de imágenes de partículas en laboratorio)

SENAMHI-DHI/SPH: Servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú – Dirección de hidrología /subdirección de predicción hidrológica.

IGP: Instituto geofísico del Perú.

OMM: Organismo mundial de meteorología.

SDRC: Stage/discharge rating curves (Curvas de clasificación de nivel /caudal)

ISO EN 748 (1997): Norma internacional que se enfoca en la medición del caudal de líquidos en canales abiertos.

ICCOR: Instantáneo caudal Correntómetro

ICDIL: Instantáneo Caudal dilución

ICCFLO: Instantáneo caudal flotador

ICCVID: Instantáneo caudal video-cámara

RMSE: Root mean Square Error (Error cuadrático medio)

PBIAS: Percent bias (Sesgo porcentual)

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo caracterizar el régimen hidrológico del río Luricocha (Ayacucho) mediante la aplicación de velocimetría de imágenes de partículas (PIV), como técnica innovadora para estimar caudales en ríos de alta montaña. Se emplearon cuatro metodologías de aforo: correntómetro, trazador químico (dilución), PIV y flotador, complementadas con la construcción de curvas altura-gasto utilizando el software Hydraccess. Resultando un total de 328 mediciones con las distintas metodologías.

Los resultados indicaron que el correntómetro presentó el mejor desempeño, especialmente para nivel de agua inferiores a 70 cm ($R^2=0.92$). La velocimetría de imágenes de partículas demostró ser eficaz en zonas de difícil acceso, aunque su precisión dependió de factores como la calidad de las imágenes, el ángulo de grabación y la turbulencia del flujo ($R^2=0.90$). El trazador químico fue adecuado para caudales bajos, pero mostró limitaciones en caudales elevados. El flotador presentó alta variabilidad para niveles superiores a 60 cm debido a la turbulencia del flujo.

En cuanto a la incertidumbre, la mayor dispersión se observó en el método PIV (31%), seguido del flotador (15%) y trazador químico (13%), estimándose una incertidumbre global de 25%. La integración de las cuatro metodologías permitió construir una curva de gasto con un ajuste global de $R^2=0.88$. La validación mostró un $R^2=0.87$, un RMSE de 0.27m³/s y un sesgo (PBIAS) de -4.03%. indicando una ligera sobreestimación de los caudales simulados.

Este estudio aporta al desarrollo de metodologías precisas para estimación de caudales en ríos de montaña y ofrece información relevante para la gestión hídrica en Ayacucho, resaltando la importancia de considerar la incertidumbre en los análisis hidrológicos bajo escenarios de flujo extremo.

Palabras clave: Régimen hidrológico, velocimetría de imágenes de partículas, estimación de caudales, curva de gasto, incertidumbre.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to characterize the hydrological regime of the Luricocha River (Ayacucho) by applying particle image velocimetry (PIV), an innovative technique for estimating flows in high-mountain rivers. Four gauging methodologies were used: current meter, chemical tracer (dilution), PIV, and float, complemented by the construction of height-discharge curves using Hydraccess software. A total of 328 measurements were obtained with the different methodologies.

The results indicated that the current meter performed best, especially for water levels below 70 cm ($R^2 = 0.92$). Particle image velocimetry proved effective in hard-to-reach areas, although its accuracy depended on factors such as image quality, recording angle, and flow turbulence ($R^2 = 0.90$). The chemical tracer was adequate for low flows but showed limitations at high flows. The float presented high variability for levels above 60 cm due to flow turbulence.

Regarding uncertainty, the greatest dispersion was observed in the PIV method (31%), followed by the float (15%) and the chemical tracer (13%), estimating an overall uncertainty of 25%. The integration of the four methodologies allowed the construction of a flow rate curve with an overall fit of $R^2 = 0.88$. The validation showed an $R^2 = 0.87$, an RMSE of 0.27 m³/s, and a bias (PBIAS) of -4.03%, indicating a slight overestimation of the simulated flows.

This study contributes to the development of accurate methodologies for estimating flows in mountain rivers and offers relevant information for water management in Ayacucho, highlighting the importance of considering uncertainty in hydrological analyses under extreme flow scenarios.

Keywords: Hydrological regime, particle image velocimetry, flow estimation, flow curve, uncertainty.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los regímenes hidrológicos en cuencas de alta montaña se ha convertido en una prioridad para la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en un contexto de creciente variabilidad climática. Estas zonas desempeñan un papel crucial como reguladoras de agua, aportando a los sistemas fluviales que abastecen de recursos hídricos a comunidades locales y regionales. Sin embargo, la falta de datos hidrométricos en zonas de difícil acceso ha sido una barrera importante para comprender las dinámicas de los caudales en estos entornos.

En este contexto. La aplicación de la velocimetría de imágenes de partículas (PIV) ha revolucionado los estudios hidrológicos al ofrecer una técnica no intrusiva y altamente útil para medir la velocidad superficial del flujo en ríos. El PIV, que ha sido utilizado extensivamente en laboratorios, ha sido recientemente adaptado para entornos naturales, permitiendo la medición de caudales en canales naturales y artificiales mediante imágenes obtenidas desde cámaras montadas en drones o estructuras fijas. Estudios recientes, como los realizados por Tauro et al. (2016) y Eltner et al. (2020), demuestran que el PIV puede proporcionar resultados favorables incluso en condiciones fluviales complejas, como las que se encuentra en cuencas montañosas.

El presente estudio tiene como objetivo aplicar la técnica de PIV para la caracterización de régimen hidrológico del río Luricocha, una cuenca de alta montaña ubicada en Ayacucho, Perú. Esta investigación busca no solo ampliar el conocimiento sobre la dinámica de los caudales en cuencas de alta montaña, sino también contribuir a la gestión integral de los recursos hídricos en la región, lo cual es fundamental para la sostenibilidad ambiental y el bienestar de las comunidades locales.

De esta manera, se espera que los resultados obtenidos mediante la caracterización del régimen hidrológico del río Luricocha puedan ser utilizados en futuros proyectos de planificación y gestión de agua en la cuenca, así como en la predicción de eventos hidrológicos extremos, como sequías e inundaciones.

Objetivo general

Caracterización del régimen hidrológico mediante velocimetría de imágenes de partículas en ríos de alta montaña: caso del río Luricocha, provincia de Huanta del departamento de Ayacucho, 2024.

Objetos específicos

- ✓ Estimar los caudales mediante diversos métodos de aforo: correntómetro, trazador químico velocimetría de imágenes de partículas y flotador.
- ✓ Definir las familias de curva altura-gasto a partir de los caudales generados por las diversas metodologías de aforo utilizando el software Hydraccess.
- ✓ Determinar la incertidumbre entre las técnicas de velocimetría de imágenes de partículas, correntómetro y trazador químico en la construcción de curva altura gasto.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Internacional

El uso de la velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) ha mostrado ser una herramienta innovadora y eficaz para la medición de caudales y velocidades de flujo en entornos complejos. Un estudio pionero realizado por Fujita, Muste y Kruger (1998) aplicó esta técnica para analizar flujos en superficies de 4 m² a 45,000 m², incluyendo el transporte de hielo y el flujo en planicies de inundación. El estudio demostró la flexibilidad de LSPIV en diferentes escenarios, tanto en laboratorio como en campo, resaltando su capacidad para proporcionar datos precisos mediante ajustes en la inundación y el preprocesamiento de imágenes.

Posteriormente, Bradley et al. (2002) aplicaron una técnica de velocimetría basada en video para estimar la descarga en el río Clear Creek. El estudio mostró que la técnica de PIV, utilizando una cámara para visualizar el flujo de trazadores, fue capaz de medir la velocidad superficial y estimar caudales con gran precisión validando la efectividad del método en la medición de caudales de inundación y su aplicabilidad en sitios no monitoreados.

En un trabajo más reciente, Liu et al. (2023) implementaron la técnica LSPIV en el río Houlong, Taiwán, utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAV) para captar la velocidad superficial del agua a diferentes alturas de vuelo. Los resultados arrojaron una mejora significativa en la precisión de las mediciones, especialmente en condiciones de alto caudal, donde un vuelo a 62 m produjo los mejores resultados.

Finalmente, Zhang et al (2024) desarrollaron un sistema de medición basado en LPPIV, que prescinde de puntos de control en tierra y utiliza un acelerómetro triaxial para la calibración rápida de cámaras. Este enfoque fue validado en el río Datong, logrando una precisión superior al 92% en todas las mediciones de velocidad superficial, lo que resalta su eficiencia en entornos hidrológicos de difícil acceso.

Estos estudios muestran la evolución de las técnicas no intrusivas de medición de caudales, desde PIV hasta la LSPIV, validando su utilidad en condiciones hidrológicas

complejas. La combinación de tecnologías como el uso de UAV y la medición precisa en ríos turbulentos proporciona una base sólida para la aplicación de estas técnicas en el estudio del régimen hidrológico del río Luricocha en el presente proyecto.

1.1.2. Nacional

La aplicación de técnicas no intrusivas para la medición de caudales ha ganado relevancia en la hidrometría peruana en los últimos años. En un estudio realizado por Sosa Sarmiento (2019) en el río Chillón, se implementó una metodología basada en videos para registrar el flujo en secciones hidrológicas monitoreadas. Los datos fueron procesados mediante PIVLab y RIVeR, lo que permitió estimar las velocidades medias con errores promedios de 22% y 17% en periodos de estiaje y avenidas, en comparación con los métodos tradicionales de correntómetro.

Por otro lado, Rosas Flores y Tejeda Flores (2020) aplicaron la técnica LSPIV en la progresiva 0+020 del canal de derivación Carapongo Bajo, ubicado en la margen derecha del río Rímac, en Lima. Para el procesamiento de los datos de velocidad superficial en flujos de superficie libre, utilizaron los softwares RIVeR y PIVlab. El análisis del flujo se realizó empleando trazadores como espuma de jabón líquido y pelotas de poliestireno, así como flujos sin trazador. Los resultados demostraron que la espuma de jabón líquido fue el trazador que proporcionó los perfiles de velocidad más definidos, concluyéndose que la técnica LSPIV es adaptable y eficaz en diversas condiciones hidrológicas.

Ambos estudios subrayan la eficacia de las técnicas PIV y LSPIV en la medición de caudales de manera no intrusiva, validando su utilidad en condiciones hidrológicas complejas, lo que refuerza su pertinencia para su aplicación en el presente proyecto en cuencas de alta montaña en Perú.

1.1.3. Velocimetría por imágenes de partículas (PIV)

La velocimetría por Imágenes de Partículas (Particle Image Velocimetry, PIV) es una técnica experimental de medición no intrusiva que permite obtener información detallada sobre experimental de medición no intrusiva que permite obtener información detallada sobre campos de velocidad en flujos fluidos. Esta metodología se basa en la iluminación de un plano del flujo mediante un haz láser y en la captura de secuencias

rápidas de imágenes de partículas trazadoras suspendidas en el fluido. El análisis de estas imágenes mediante algoritmos de correlación cruzada permite calcular los desplazamientos y, por tanto, los vectores de velocidad (Raffet et al., 2007 Adrian & Westerweel, 2011)

1.1.4. Principio de funcionamiento

El procedimiento típico de PIV incluye la introducción de partículas neutrales y reflectantes en el fluido, la iluminación de un plano de interés mediante láseres de doble pulso, y la captura de imágenes secuenciales usando cámaras CCD o CMOS. Las imágenes obtenidas son divididas en ventanas de análisis, sobre las cuales se aplica correlación cruzada para determinar los desplazamientos promedios de partículas entre fotogramas consecutivos. Estos desplazamientos se convierten posteriormente en velocidades utilizando la escala espacial y el intervalo de tiempo entre disparos (Adrian & Westerweel, 2011; Scarano, 2002).

1.1.5. Aplicaciones en la Ingeniería y la Ciencia

PIV ha sido ampliamente utilizada en diversos campos como la aerodinámica, la hidrodinámica, la biomecánica y la meteorología. En ingeniería fluvial, permite visualizar la estructura de flujos turbulentos en ríos, canales y estructuras hidráulicas, mejorando la comprensión de fenómenos como la separación de flujo, la recirculación y la interacción entre el flujo y los sedimentos (Elsinga et al., 2006; Westerweel et al., 2013).

1.1.6. Ventajas y Precisión

Una de las principales ventajas del PIV es la capacidad para medir simultáneamente campos de velocidad en dos o tres dimensiones con alta resolución espacial. Además, al ser una técnica no intrusiva, no altera el flujo durante la medición. Sin embargo, la calidad de los resultados depende de factores como la homogeneidad de la iluminación, la densidad de partículas trazadoras y la configuración óptima del sistema (Scarano, 2013; Raffel et al., 2018).

1.1.7. Evolución y Nuevas tendencias

El desarrollo tecnológico ha permitido la evolución del PIV hacia técnicas como el Tomographic PIV (Tomo-PIV) para la medición tridimensional completa del flujo, y el Micro-PIV, utilizando en microfluidos. Asimismo, la integración de PIV con

simulaciones numéricas (CFD) ha permitido validar modelos computacionales de forma más robusta (Scharnowski et al., 2012; Atkinson & Soria, 2009).

1.1.8. Hidrometría

El término hidrometría proviene del griego hydro (agua) y metría (medición), y hace referencia a las técnicas utilizadas para cuantificar el agua presente en riachuelos, ríos o canales. Esta disciplina se encarga de recopilar y suministrar información sobre la distribución espacial y temporal de recurso hídrico en la superficie terrestre (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

En el marco de la hidrología la hidrometría se define como la rama dedicada a medir volumen de agua que atraviesa una sección transversal en un intervalo de tiempo determinado. Asimismo, abarca la planificación, ejecución y procesamiento de los datos generados en diversos sistemas hidráulicos, tales como cuencas hidrográficas, redes de riego y abastecimiento urbano, así como sistemas de saneamiento (Abdelkader, 2012).

Por otro lado, la hidrometría también se relaciona con la hidrodinámica, ya que incluye los métodos para medir la velocidad, el caudal y las fuerzas que ejercen los líquidos en movimiento. Además, comprende la evaluación de los niveles de agua, el transporte y concentración de sedimentos, así como los levantamientos topográficos de los perfiles longitudinales y transversales de los cauces naturales (Pérez, 2005).

1.1.9. Estación hidrometría

“Red integrada de estaciones hidrométricas pertenecientes a una cuenca, región o nación, operadas de manera coordinada conforme a un programa de monitoreo hidrológico” (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

1.1.10. Sección de aforo o ce conotrol hidrométrico

Es el tramo transversal del cauce donde se efectúan mediciones periódicas de caudal con el propósito de determinar la relación entre el nivel de agua y el gasto, estando dicho punto de aforo vinculado directamente a la estación hidrométrica (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

Es la sección transversal del cauce seleccionada para el aforo que mide el caudal de la corriente, lo que requiere un conjunto de mediciones complementarias y precisas

que permitan determinar con exactitud el flujo de agua. Este procedimiento se complementa con el levantamiento alimétrico de la sección transversal correspondiente en la estación o punto de aforo (Briones, 2021).

1.1.11. Caudal

El caudal de un río se define como la descarga líquida que incorpora el volumen de agua que atraviesa una sección transversal o punto de control en un intervalo de tiempo determinado. Habitualmente, se expresa en (m^3/s) o (L/s). Es importante señalar que, en una estación hidrométrica, el caudal suele estar asociado a un nivel relativo y/o absoluto (SENAMHI, 2018). Según el organismo meteorológico mundial, “el caudal de un río corresponde a la cantidad de agua que fluye a través de una sección transversal y se expresa en volumen por una unidad de tiempo” (OMM, 1994)

Asimismo, se entiende por caudal al volumen de agua que circula por un río, riachuelo, tubería o tramo de una corriente, así como al generado por un pozo o al que ingresa o egresa de una planta de tratamiento, el cual siempre se mide en función al tiempo (Goicochea, 2013).

1.1.12. Aforo

El aforo es el proceso mediante el cual se mide el caudal, entendiendo como el volumen de agua que atraviesa una sección del río por una unidad de tiempo. Esta medición puede realizarse a partir de la determinación directa del gasto o bien calculado la velocidad del flujo y el área de la sección transversal (OMM, 2010).

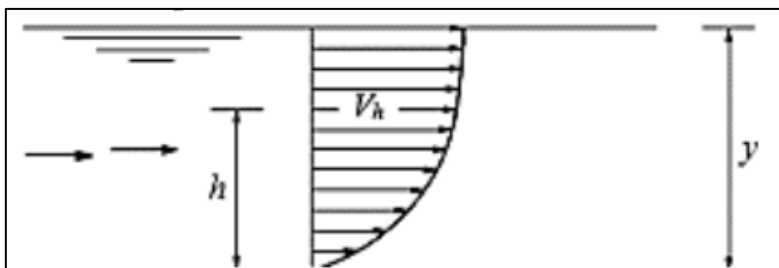
Para llevar a cabo el aforo, se registran parámetros como la velocidad del flujo, la profundidad de la sección y la separación entre los verticales de observación a lo largo del canal. En diversos puntos de cada vertical se efectúan mediciones de la velocidad, además de la profundidad. Finalmente, el cual el caudal total se obtiene multiplicando la velocidad por el área de cada segmento de la sección (Herschy, 2009).

1.1.13. Velocidad

En un cauce, la velocidad de la corriente de agua presenta variaciones significativas: tienden a ser cercanas al cero en las orillas y en el fondo, mientras que alcanzan valores elevados, de varios metros por segundo, justo por debajo de la superficie libre. El perfil de las velocidades se define como el lugar geométrico de los puntos que corresponden a los extremos de dichos valores, los cuales representan la distribución de la velocidad de la corriente a una profundidad de flujo determinada. (Pérez, 2005).

Figura 1.1

Perfil de velocidades en corrientes naturales



Fuente: (Pérez, 2005).

1.1.14. Batimetría

La batimetría comprende el conjunto de técnicas empleadas para medir y describir la profundidad y la morfología del lecho de un cuerpo de agua, tales como ríos, embalses, bahías, lagos, ciénagas, océanos, mares y estuarios. Su propósito es obtener el perfil y la topografía del fondo, lo que facilita el cálculo de secciones transversales y volúmenes, además de servir de apoyo en la estimación de caudales y en el diseño de obras hidráulicas (OMM, 2010).

1.1.15. Mediciones del nivel de agua

Las mediciones del nivel de agua en una estación hidrométrica, puede efectuarse en horarios determinados o de manera continua mediante equipos registradores o sensores de nivel. En el primer caso, emplea la regla limnimétrica, un instrumento segmentado con graduaciones en centímetros, pintados de alto relieve, cuyo diseño varía según el material de fabricación (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

Figura 1.2

Reglas Limnimétricas instaladas en cursos de agua



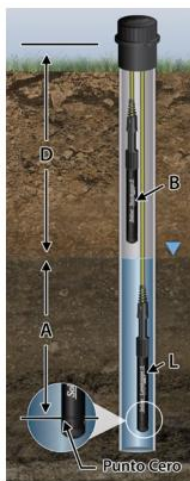
Fuente: (SENAMHI-DHI/SPH, 2018)

1.1.16. Sensores levelogger y barologger

Los Leveloggers son registradores de datos que miden y almacenan información de nivel operan midiendo la presión absoluta, que es la suma de la presión de agua y la presión atmosférica. Para obtener mediciones precisas del nivel del nivel de agua, es esencial compensar las variaciones en la presión barométrica. Aquí es donde intervienen los Barologgers, que registran exclusivamente la presión atmosférica. Al combinar los datos de ambos dispositivos, se pueden corregir las mediciones del Levelogger para reflejar únicamente la presión ejercida por la columna de agua (Solinst, 2024).

Figura 1.3

Estación hidrométrica con sensores levelogger y barologger



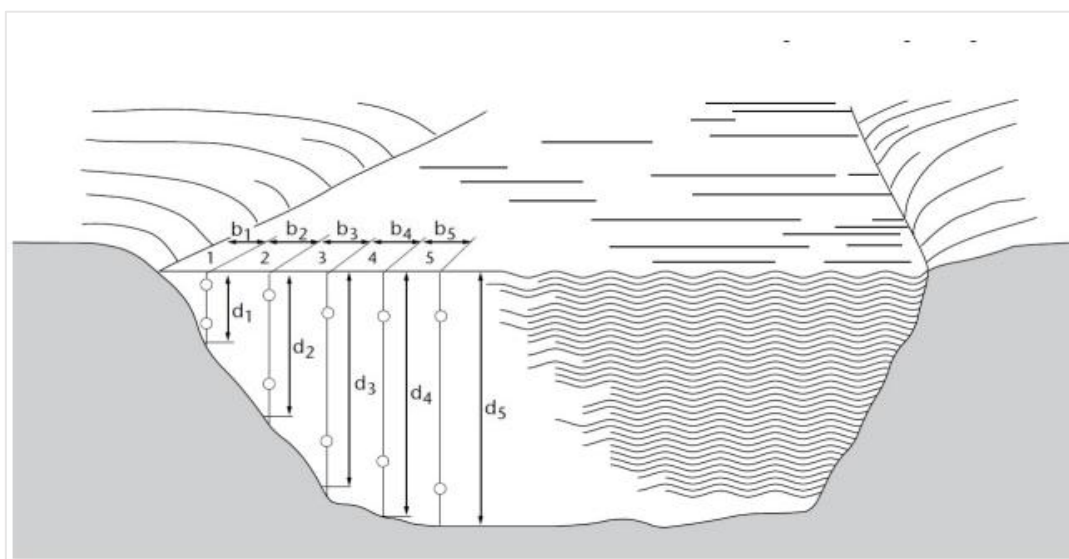
Fuente: Solinst, (2024)

1.1.17. Medición del caudal por el método del correntómetro

En el aforo con correntómetro se aplica el método área-velocidad. En el ámbito de las actividades hidrológicas, el área se determina mediante sondeos de profundidad realizados a intervalos constantes a lo largo de la sección de control; mientras que la velocidad se mide empleando el correntómetro o molinete y/o sensores de velocidad (SENAMHI-DHI/SPH,2018).

Figura 1.4

Vista de una sección transversal de una corriente



Fuente: OMM N° 168

La cantidad de secciones y puntos de medición se define en función a nivel de precisión que se desea alcanzar; en otras palabras, a mayor número de secciones y puntos evacuados, mayor será la exactitud de los resultados.

Tabla 1.1

Relación entre el ancho y los puntos de medición.

Ancho superficial de la sección del río (m)	Distancia entre los puntos de medición o ancho del tramo (m)
< 10	Porcentaje 10% - 15%
10 - 20	Ancho superficial 1
20 - 40	2

40-60	3
60-80	4
80-100	5
100-150	6
150-200	10
Más de 200	15

Fuente: (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

Otro criterio para definir el número de verticales se encuentra en la norma ISO 748 “Measurements of liquid Flow in open channels velocity-area methods”

Tabla 1.2

Relación entre el ancho superficial y número de verticales.

Ancho del cauce (m)	Número de verticales (n)
$0 < B < 0.5$	3 a 4
$0.5 < B < 1$	4 a 5
$1 < B < 3$	5 a 8
$3 < B < 5$	8 a 10
$5 < B < 10$	10 a 20
$10 < B$	≥ 20

Fuente: (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

La norma ISO 748, sugiere que el número de franjas verticales utilizadas para medir la velocidad debe seleccionarse de manera que el caudal de cada una no exceda el 10 % del caudal total, constituyendo así un criterio orientativo y un indicador de la calidad de aforo.

1.1.17.1. Métodos y procedimientos de la medición de la velocidad media en vertical

La elección del método más apropiado para medir la velocidad está definida por factores del tiempo disponible para el aforo, el ancho de la sección, la profundidad del flujo, las peculiaridades del hecho, fluctuaciones de nivel de agua y el grado de precisión requerido (OMM, 2008).

Tabla 1.3

Métodos de los puntos reducidos.

Nº de mediciones	Profundidad del curso de agua (cm)	Puntos de observación (medidos desde la superficie libre)	Velocidad media
1	30-60	0.6D	V(60%)
2	60-300	0.2-0.8D	0.5(V(20%)+V(80%))
3	300-600	0.2, 0.6 y 0.8D	0.25(V(20%)+2V(60%)+V(80%))
5	600	30cm, 0.2, 0.6, 0.8D y 30cm sobre el fondo	0.1(Vsup+3V(20%)+2V(60%)+3V(80%)+Vf)

Fuente: Solange Dussaubat, Ximena Vargas

Según el SENAMHI, la aplicación del método de los dos puntos reducidos contempla tres modalidades: la medición en un solo punto, dos puntos y tres puntos.

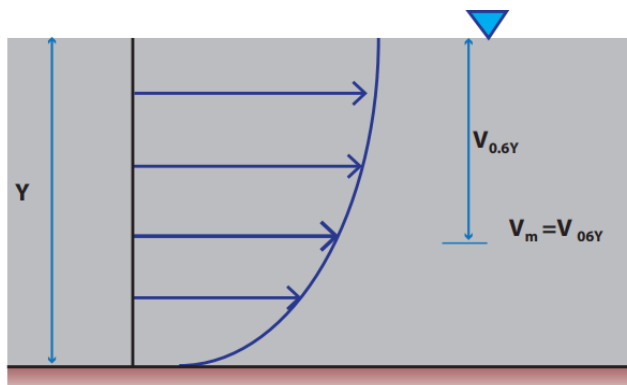
1.1.17.2 Método de un punto

Este método se basa en medir la velocidad situando el molinete al 60% de la profundidad desde la superficie, considerando dicho valor media (V_m) de la vertical. Su aplicación es recomendable cuando la profundidad del cauce es menor a 0,70m.

$$V_m = V_{0.6y} \tag{1}$$

Figura 1.5

Ubicación de la velocidad media con el método de un punto.



Fuente: (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

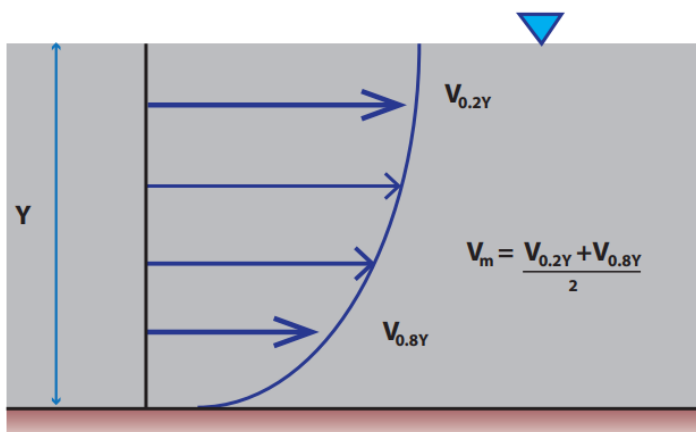
1.1.17.3. Método de dos puntos

Este método consiste en obtener la velocidad colocada en el molinete de 20% y 80% de la profundidad a partir de la superficie o fondo de cauce, por lo que la velocidad media en la vertical se obtiene con la ecuación dos. Este método se aplica cuando las profundidades en la vertical son superiores a 70cm.

$$V_m = \frac{V_{0.2y} + V_{0.8y}}{2} \quad (2)$$

Figura 1.6

Ubicación de la velocidad media con el método de dos puntos.



Fuente: (SENAMHI-DHI/SPH, 2018)

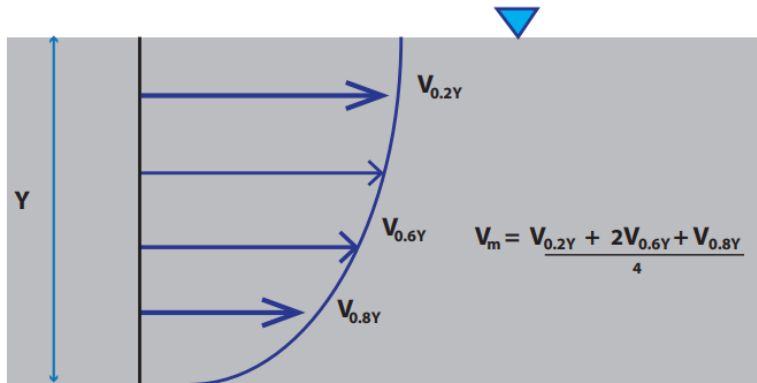
1.1.17.4. Método de tres puntos

Este método determina la velocidad ubicando el molinete al 20%, 40% y 80% de la profundidad medida desde la superficie. A partir de estos registros se calcula velocidad media. Su uso es apropiado cuando la profundidad supera los 70cm en condiciones especiales como aforos bajo hielo o en canales cubierta de vegetación acuática se emplea.

$$V_m = \frac{V_{0.2y} + 2V_{0.6y} + V_{0.8y}}{4} \quad (3)$$

Figura 1.7

Ubicación de la velocidad media con el método de tres puntos.



Fuente: (SENAHMI-DHI/SPH, 2018).

1.1.17.5. Método de cinco puntos

Para este método se emplea la siguiente ecuación:

$$V_m = \frac{V_{Sup} + V_{0.2y} + 2V_{0.6y} + V_{0.8y} + V_{lecho}}{10} \quad (4)$$

1.1.17.6. Procedimiento del cálculo del caudal

El caudal en una variable que depende directamente del área de la sección y la velocidad media, que se obtiene de la siguiente manera.

$$q_1 = V_{m1} * A_1 \quad (5)$$

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n \quad (6)$$

Donde: V_{m1} : velocidad media en el primer vertical (m/s), A_1 : Área de la sección del primer vertical (m^2), q_1 : Caudal para el primer vertical cúbicos por segundo (m^3/s), q_2 : Caudal para el segundo vertical en metros cúbicos por segundo (m^3/s), q_n : Caudal para el último vertical en metros cúbicos por segundo (m^3/s) y Q : Sumatoria de caudales de todos los verticales (m^3/s).

1.1.18. Medición del caudal por el método del flotador.

A pesar de la existencia de equipos para medir la velocidad del agua, el método de flotadores es útil en condiciones de alta velocidad presencia de cuerpos extraños que

pueden dañar a los hidromensores. Este método implica usar objetos flotantes para medir el tiempo que tarda en recorrer una distancia determinada, estimando así la velocidad superficial y el caudal del agua. Los flotadores pueden ser elementos naturales o artificiales, como trozos de madera o botellas plásticas con agua. (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

Tabla 1.4

Relación entre el ancho superficial del río y la cantidad de flotadores a emplear

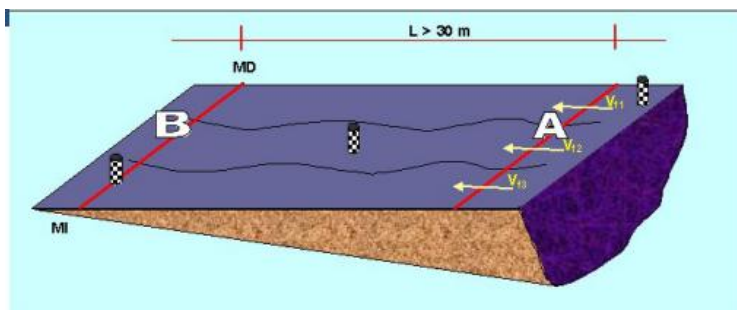
Ancho de sección	< a 50m	50-100m	100-200m	200-400m	400-800m	> a 800m
N° de tramos que se divide la sección de control y cantidad mínima de aforos	3	4	5	6	7	8

Fuente: (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

Asumiendo que la trayectoria de los flotadores sea recta y paralela a la corriente, se obtendrá tiempos para un mismo espacio, que al ser remplazado en la ecuación 7 tendremos la velocidad superficial del río.

Figura 1.8

Tramo en la sección de control en un curso de agua, aforo con flotadores



Fuente: (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

$$V_i = \frac{L}{t_i} \quad (7)$$

Donde:

L: Distancia del tramo recto en metros (\geq a 30m), t_i : Tiempo que demora el flotador en recorrer la distancia L y V_i : Velocidad del flotador.

Al promediar las velocidades parciales, se obtendrá la velocidad superficial promedio V_{sp} a todo el ancho del cauce. Luego se definirá la velocidad promedio de la sección V_m , para lo cual se tendrá en cuenta la relación de V_m/V_{sp} .

$$K = \frac{V_m}{V_{sp}} \quad (8)$$

Donde:

V_m : Velocidad promedio

V_{sp} : Velocidad superficial promedio

K: Coeficiente de corrección de velocidad

En general el K suele oscilar entre 0.45 y 0.95 dependiendo la morfología del cauce, la rugosidad, entre otras condiciones hidráulicas. En la práctica, el valor de la K se estima realizando campañas de aforo con correntómetro y flotadores en forma paralela.

1.1.18.1. Determinación del área de la sección transversal

Para determinar el área en la sección de control, se empleará la metodología utilizada en el aforo por vadeo o suspensión según sea el caso.

$$A = bh_1 + bh_2 + \dots + bh_N \quad (9)$$

Donde:

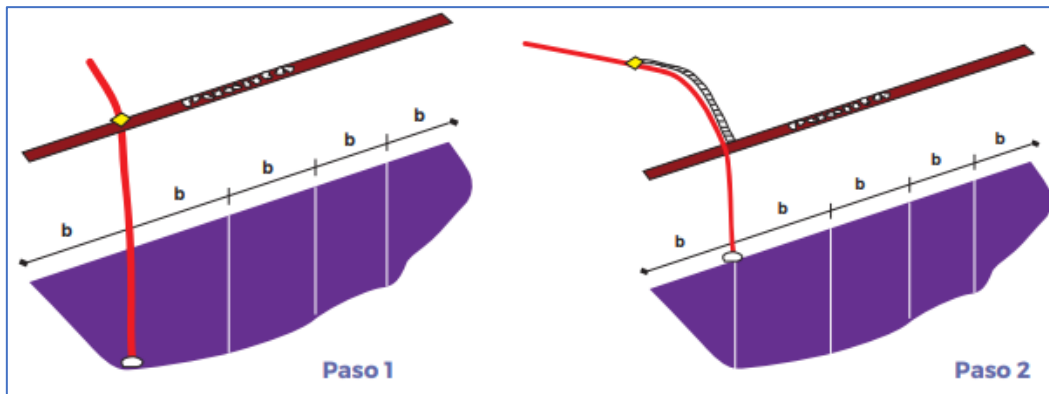
B: Amplitud de cada segmento del tramo

h_N : Profundidad en cada línea de medición

N: Número de línea de medición.

Figura 1.9

Procedimiento para determinar el área en la sección de control.



Fuente: (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

1.1.18.2. Procedimiento del cálculo del caudal

El caudal es una variable que depende directamente del área de la sección y la velocidad media del agua, por lo que se obtendrá de la siguiente manera.

$$Q = V_m * A \quad (10)$$

Donde:

V_m : Velocidad media de la sección en metros por segundo (m/s), A : área de sección de control en metros (m^2) y Q : Caudal en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

1.1.19. Medición del caudal por el método de dilución

La medición del caudal por este método depende de la determinación del grado de dilución en el río de una solución trazadora que se añade. El método se recomienda únicamente en lugares donde no se puedan emplear los métodos tradicionales, debido a la poca de sedimentos (OMM, 2008).

1.1.19.1. Selección de sitio de aforo

El criterio fundamental para la selección del sitio de este método es la mezcla adecuada de la solución inyectada con el agua de la corriente. Las condiciones más recomendables es la fuerte rugosidad de lecho del río, la turbulencia y la topografía accidentada. Cuanto más grandes es la relación profundidad ancho menor es la distancia necesaria para obtener una mezcla adecuada. (OMM. 2008).

1.1.19.2. Trazadores o equipos de detección

Los trazadores más comunes reúnen estas características:

- ✓ Se disuelve rápidamente en el agua de la corriente a temperaturas normales.
- ✓ No se encuentra normalmente en el agua del río o solo en cantidades ínfimas.
- ✓ No se descompone en el agua del río, ni es retenida o absorbida por sedimentos, plantas u organismos.
- ✓ Su concentración puede ser medida en forma exacta.
- ✓ Es inofensiva para los seres vivos en las concentraciones que se utiliza.

1.1.19.3. Cálculo del caudal

“Las ecuaciones utilizadas para calcular el caudal de una corriente, Q están basadas en el principio de continuidad del trazador” (OMM, 2008).

$$Q = \frac{Q_{tr}c_i}{c_s} \dots \dots \dots (inyección continua) \quad (11)$$

$$Q = \frac{c_i V}{\int_0^{\infty} c_s dt} \dots \dots \dots (inyección instantánea) \quad (12)$$

Donde:

Q_{tr}: es la proporción de inyección, C_i: la concentración de la solución inyectada, C_s: la concentración en la sección de muestreo, V: el volumen de la solución inyectada y t: tiempo.

1.1.20. Selección de punto de control

No es necesario que la medición de caudal se haga en un lugar exacto en que se ha instalado la estación de aforo, ya que el caudal es normalmente el mismo en las proximidades de la estación. Los sitios seleccionados para la medición deben tener las siguientes características:

- ✓ Velocidades paralelas en todos los puntos y que formen ángulos rectos con la sección transversal de la corriente.

- ✓ Curvas regulares de distribución de velocidad en la selección, en los planos verticales y horizontales.
- ✓ Velocidades superiores a 0.150 m/s
- ✓ Lecho del río uniforme y estable.
- ✓ Profundidades superiores a 0.3 m.
- ✓ Ausencia de plantas acuáticas.

1.1.21. Curva de gasto

La curva de gasto o curva altura- caudal constituye una herramienta hidrométrica fundamental que permite estimar el caudal de un río a partir de mediciones continuas del nivel del agua. Esta relación empírica se construye mediante aforos simultáneos de nivel y caudal, los cuales son ajustados mediante expresiones matemáticas que representan el comportamiento hidráulico del cauce en una sección específica (Chow, 1985).

En términos operativos, la curva de gasto se expresa como una función matemática que vincula el nivel del agua con el caudal correspondiente, comúnmente utilizando ajustes polinomiales o exponenciales. Esta relación es de vital importancia para el monitoreo hidrológico continuo, ya que permite transformar los registros automáticos de nivel en valores de caudal (CEDEX, 2004).

La curva de gasto de la sección de aforo o curva altura gasto es el elemento más importante en la práctica hidrométrica, toda vez que a partir de la relación nivel caudal se determina el caudal circulante en un río o canal en cualquier instante de tiempo de caudales horarios, diarios, mensuales y anuales de la estación hidrométrica. (SENAMHI-DHI/SPH. 2018).

1.1.22. Métodos estadísticos de validación de resultados

Según Huaccoto (2017) el proceso de validación, traslada la aceptación como simulador confiable del modelo físico, quiere decir que no significa que los resultados deben admitirse como estrictamente verdadero, sino que la estructura no contenga errores lógicos. La medición de los errores estadísticos es una herramienta que emplea con mayor frecuencia para determinar la exactitud de los pronósticos, estas mediciones emplean los valores absolutos o el cuadro de errores estadísticos, como regla general entre más pequeño sea la suma de errores (Canales, 2015 citado por Huaccoto 2017).

El error cuadrático medio (RMSE) mide el error que existe entre dos conjuntos de datos. RMSE es la desviación estándar de los residuales y es un indicador de la fiabilidad de la predicción (More, 2021).

El error relativo porcentual medio (PBIAS) es una medida de la diferencia entre el valor esperado de una estimación y el valor verdadero del parámetro que se estima. Un sesgo alto indica que la estimación sistemáticamente sobreestima o subestima el valor real (More, 2021).

El coeficiente de determinación (R^2) es un parámetro estadístico que evalúa el grado de ajuste de la curva al conjunto de datos observados. Un valor cercano a 1 indica un buen ajuste entre el nivel observado y el caudal calculado (Morena, 2021).

Tabla 1.5

Indicadores estadísticos utilizando para la comparación de ellos métodos.

Indicadores estadísticos	Ecuación	Valor óptimo
Raíz del error cuadráticos medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{n}}$	0
Error Relativo Porcentual Medio (PBIAS)	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i})} * 100$	0
Coefficiente de Determinación (R^2)	$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$	1

Fuente: (Lujano et al. 2019)

Donde:

Qo: Caudal observado (aforado);

Qs: Caudal con la curva desgasto;

n: Número de datos; RSS: Suma de cuadrados de los residuos

TSS: Suma total de cuadrados.

Tabla 1.6*Criterio de interpretación de índice de fiabilidad*

R²	Desempeño	RMSE	Desempeño	PBIAS	Desempeño
1	Correlación positiva perfecta			> 0	Subestimación
0	Sin relación	0	Valor óptimo	0	Óptimo
< 0	Correlación negativa			< 0	Sobrestimación

Fuente: Camargo & Sentelhas (1997)

1.1.23. Incertidumbre durante crecidas

Al igual que el estiaje, las crecidas son eventos extremos, con un periodo de retorno largo, y por consiguiente son pocos frecuentes y medibles. Una crecida esta caracterizada por el nivel alto de agua y velocidades mucho más importantes que durante el régimen hidrológico normal. En la mayoría de los cauces, una crecida está asociada a un fuerte transporte de materias sólidas en suspensión o por arrastre, y un importante transporte de objetos flotantes. Una medida precisa del caudal durante crecidas es esencial para validar los modelos hidrológicos de crecidas (Abdelkader, 2012).

1.1.24. Implicaciones en la extrapolación de la curva de gasto

Es muy difícil estimar los caudales de en las crecidas y estiajes. Se parte de una serie de pares nivel-caudal limitada dentro de un rango donde el aforo es posible. La curva de gasto procedente de estos datos se puede separar en dos partes La medida y la parte extrapolada. En general, la extrapolación para los pequeños caudales es muy delicada a causa de la variación de la batimetría del lecho en niveles bajos y la poca sensibilidad de la relación nivel-caudal. La extrapolación para caudales de crecidas debe apoyarse sobre bases hidráulicas, y debe establecerse en función de la topografía del cauce (Abdelkader, 2012).

1.1.25. Incertidumbre temporal de las descargas de curvas de gasto

Una curva de gastos proporciona una estimación de las descargas fluviales basadas en niveles de agua. Esta estimación contiene un nivel de incertidumbre. La incertidumbre inicial se produce en el momento de elaborar la curva de gastos. Esto puede ser debido, por ejemplo, a la aleatoriedad de los procesos naturales o por la medición inexacta del nivel. La incertidumbre temporal está relacionada con los procesos bien

conocidos de la erosión y la deposición que modifican la geometría del lecho del río y, en consecuencia, la relación entre nivel y la descarga (Jalbert et al., 2011).

1.1.26. Evaluación de la incertidumbre global

Di Baldassarre y Montanari (2009) observaron que las principales fuentes de error que afectan al caudal son el error en las mediciones del caudal (ε_1); y el error debido a la incertidumbre de curva de calificación nivel caudal (ε_2) que a su vez es inducida por su error de interpolación y extrapolación, la presencia de condiciones de flujo inestable y cambios estacionales de rugosidad. Estos autores asumieron que la incertidumbre global puede obtenerse mediante:

$$\varepsilon(Q(x, t)) = \pm \varepsilon_1(Q(x, t)) + \varepsilon_2(Q(x, t)) \quad (13)$$

En este estudio se utilizan enfoques tradicionales para inferir ε_1 , mientras que se desarrollan técnicas originales para evaluar la incertidumbre de la curva de calificación nivel caudal ε_2 . Esta última es una tarea difícil ya que la metodología depende de la información disponible. En aplicaciones prácticas, la falta de información relacionada con ε_2 , nos llevó a evaluar la incertidumbre utilizando la desviación del caudal estimada directamente a partir de las mediciones de caudal observado (Q_g) del caudal predicha a partir del ε_2 (Q_{rc}).

1.1.26.1. Evaluación de la incertidumbre de las mediciones de descarga (ε_1)

La fuente inicial de error resulta de las mediciones Q . Para cuantificar esta incertidumbre, la norma europea ISO EN 748 (1997) ofrece una metodología para cuantificar estos errores con un nivel de confianza del 95%:

$$\varepsilon_1 = \pm \sqrt{X_A^2 + \frac{1}{m}(X_e^2 + X_c^2 + X_b^2 + X_d^2 + X_p^2)} \quad (14)$$

Donde:

ε_1 : Es el error de la medición de caudal en (%)

X_A : Es el error debido a la elección del número de puntos en una verticales

X_b : Es la incertidumbre que afecta a la medición del ancho de la sección transversal.

X_d : Es la incertidumbre que afecta a la medición de nivel de agua.

X_e : Es la incertidumbre de la velocidad del flujo relacionada con la duración de la medición.

X_p : Es la incertidumbre de la velocidad del flujo en función del número de puntos de medición a lo largo de cada uno de los tramos verticales realizados, cuando se han realizado al menos 5.

X_c : Es la incertidumbre de la velocidad del flujo asociada a la calibración del instrumento de medición. Cada incertidumbre singular se ha calculado siguiendo las fórmulas establecidas por Herschy (1970) .

1.1.26.2. Evaluación de la incertidumbre de descarga en las curvas de clasificación de caudal por etapas (ϵ_2)

La incertidumbre del ϵ_2 se basa en el concepto de que nivel de agua es incierto a través de sus propios errores de medición. Tomkins (2014) analizó la incertidumbre en curvas de clasificación nivel caudal en los valores de caudales estimados directamente a partir de las mediciones del caudal y su correspondencia dentro del ϵ_2 . De esta manera, se estimó la desviación relativa de las mediciones con respecto al curva de clasificación correspondiente para obtener la incertidumbre entre los valores del caudal.

$$\epsilon_2 = \left[\frac{Q_g - Q_{rc}}{Q_{rc}} \right] * 100 \quad (15)$$

Esta ϵ_2 (%) indica el grado de ajuste entre el caudal directamente estimado a partir de las mediciones de campo y el caudal predicho a partir de la ecuación de la curva de gasto para cada medición individual. Los resultados pueden clasificarse como buenos para $\epsilon_2 = \pm 10\%$; aceptable $\pm 11-20\%$; dudoso $\pm 21-50\%$ y subestimado o sobreestimado $\geq \pm 50\%$ (Tomkins, 2014).

1.1.27. Software Hydraccess

Hydraccess es un software integral, homogéneo y amigable y de fácil manejo que permite importar, almacenar y procesar diversos tipos de datos hidrológicos en una base de datos en formato Microsoft Access 2000, facilitando a los estudiantes, ingenieros e

investigadores la administración, visualización y análisis de información. El programa combina en uso de Access con hoja de cálculo de Excel en incluye una macro que posibilita la representación de los datos en gráficos simples o comparativos, los cuales pueden manipularse libremente y ajustarse a intervalos de tiempo acordes con la variabilidad de los registros. Su versatilidad lo hace adecuado para el tratamiento de información desde microcuencas hasta grandes ríos, incorporando además funciones específicas para pequeñas cuencas, como el análisis de eventos lluvia-caudal y la evaluación de intensidades de tormenta (Vauchel, 2000).

1.1.28. Software RIVeR

RIVeR es una aplicación independiente desarrollada en el centro de investigación y tecnológica del agua (CETA) de la Universidad nacional de Córdoba, Argentina, a partir de 2013. Esta aplicación es gratuita y está integrada en Matlab. Actualmente hay una versión compilada de la aplicación disponible en <http://riverdischarge.blogspot.com/>. RIVeR ha sido desarrollado con el fin de proporcionar una caracterización experimental eficiente de la superficie del agua a gran escala (por ejemplo, velocidades y trayectorias de flujo) y estimación de caudal en ríos, canales artificiales (por ejemplo, riego, plantas de tratamiento y otros). Modelos físicos hidráulicos a gran escala. (Patalano et al., 2017).

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

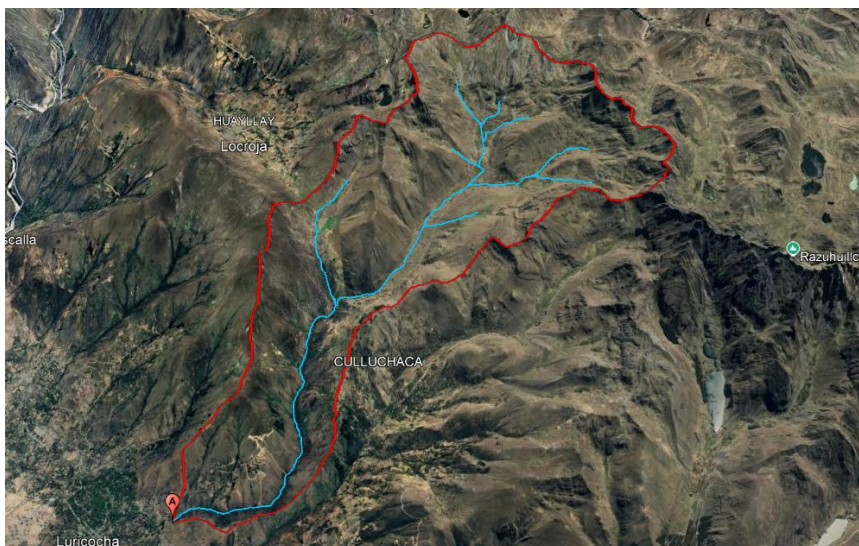
2.1 Ubicación del estudio

El estudio se realizó en el río Luricocha, ubicado en la provincia de Huanta, región Ayacucho. El punto exacto del estudio donde se instaló los sensores de nivel de agua se encuentra en las coordenadas UTM E: 580333.4 N: 8574113.1 Z: 2748msnm. Este río de alta montaña forma parte de la cuenca hidrográfica del río Cachi y es una fuente hídrica fundamental para las comunidades locales. La cuenca presenta una topografía accidentada, con elevaciones significativas y un clima estacional, caracterizado por intensas lluvias en la temporada húmeda (diciembre a marzo) y sequía prolongada en los meses secos (mayo a septiembre). Esta variabilidad climática genera fluctuaciones notables en el caudal del río, lo cual impacta su régimen hidrológico.

La selección del río Luricocha como área de estudio responde a la necesidad de comprender mejor los patrones hidrológicos en ríos de alta montaña. Este río presenta condiciones ideales para aplicar la técnica de PIV debido a su flujo turbulento y pendientes pronunciadas, lo cual permitirá caracterizar la dinámica del flujo y su velocidad en un contexto de alta montaña. Los resultados de este estudio ofrecerán información clave para el manejo sostenible del agua en Ayacucho y contribuirán a la conservación de recursos hídricos en regiones similares.

Figura 2.1

Área de influencia al punto de aforo



Nota: Ubicación del área de estudio, Fuente: Google Earth.

2.2 Población, muestra y muestreo

2.2.1 Población

La población de estudio está compuesta por el río de alta montaña en la región de Ayacucho, específicamente en el río Luricocha. Este río presenta características hidrológicas propias de áreas montañosas, con variaciones estacionales significativas en los caudales y condiciones de flujo. Los datos fueron recolectados desde el 17/01/2025 hasta 17/06/2025 abarcando niveles bajos hasta crecidas más significativas, lo que permitió evaluar el comportamiento del régimen hidrológico en una variedad de condiciones.

2.2.2 Muestra

La muestra de este estudio consistió en los datos obtenidos en las estaciones de aforo seleccionadas a lo largo del río Luricocha durante el periodo de investigación. Se registraron un total de 330 mediciones de caudal utilizando las cuatro metodologías de aforo: correntómetro, trazador químico, velocimetría de imágenes de partículas y flotador. Estas mediciones se distribuyeron de la siguiente manera: 80 datos con el correntómetro, 82 con el trazador químico, 82 con la videocámara y 86 con el flotador, lo que permitió un análisis comparativo de la precisión y eficiencia de cada técnica bajo diferentes condiciones hidrológicas.

2.2.3 Muestreo

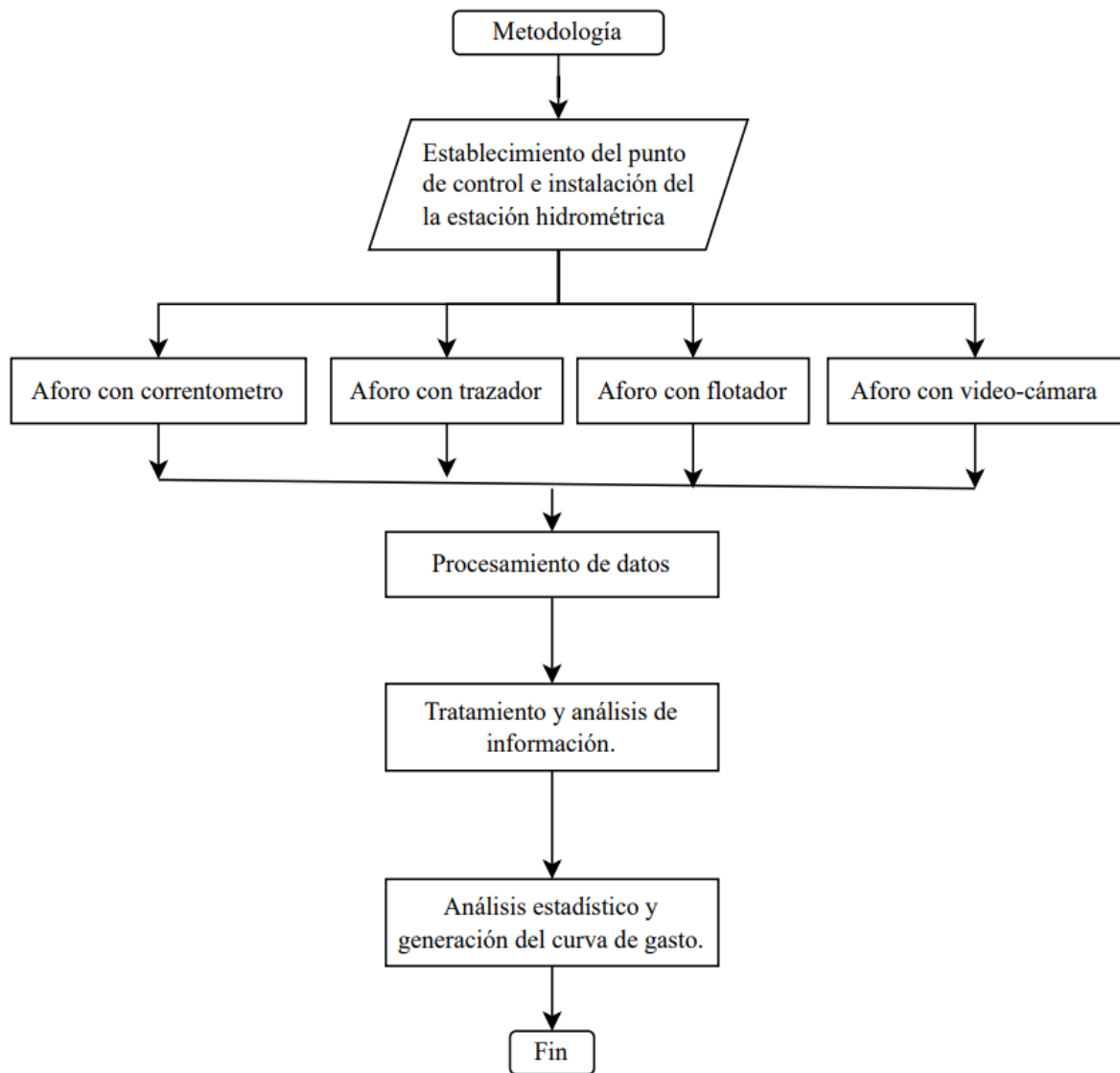
El muestreo fue de tipo no probabilístico y por conveniencia, ya que se seleccionaron los puntos de aforo más representativos en la cuenca del río Luricocha, según las condiciones hidrológicas y logísticas del estudio. Las mediciones fueron tomadas de manera regular durante el periodo de monitoreo, en intervalos estratégicos que permitieran capturar la variabilidad de los caudales en distintas condiciones de flujo. El muestreo abarcó tanto períodos de flujo bajo como durante eventos de crecidas, asegurando una representación adecuada de los diferentes regímenes hidrológicos del río.

2.3 Materiales y equipos

- ✓ Correntómetro electromagnético OTT MF Pro
- ✓ Medidor multiparámetro (Hanna)
- ✓ Sonda multiparamétrica ProDSS (YSI)
- ✓ Cámara de video
- ✓ Flotadores
- ✓ Tubo galvanizado 2 1/2"
- ✓ Sensor Levelogger
- ✓ Sensor Barologger
- ✓ Wincha
- ✓ Flexómetro
- ✓ Cordel
- ✓ Regla metálica de 60cm
- ✓ Traje impermeable
- ✓ Trípode
- ✓ Libreta de apuntes
- ✓ Laptop
- ✓ Spray (pintura)

2.4 Metodología

El presente estudio está dividido en dos etapas: trabajo de campo y Gabinete. En la primera etapa, se realizó el reconocimiento de campo, ubicación del punto de control e instalación de sensores hidrométricos, mediciones hidrométricas con correntómetro, disolución, video-cámara y flotador. En la etapa de trabajo de gabinete, se llevó a cabo el procesamiento de datos, análisis y tratamiento de datos con Hydraccess, generación de curva de gasto y familia de curva de gasto con Hydraccess y la estimación de la incertidumbre.



Nota: Diagrama de la metodología empleada.

2.4.1 Trabajo de campo

2.4.1.1 Reconocimiento de campo

El reconocimiento del campo es una fase inicial en la que se evaluó las características físicas del área de estudio para identificar posibles ubicaciones de puntos de control y zonas adecuadas para la instalación de sensores, se seleccionó un lugar estratégico en el cuerpo de agua que permita obtener mediciones representativas y estables, considerando factores como accesibilidad y seguridad.

2.4.1.2 Instalación de sensores de nivel de agua

Para la instalación correcta de los sensores de nivel de agua, se siguió el siguiente procedimiento:

- ✓ **Fijación de la tubería:** Se instaló una tubería galvanizada de 2 pulgadas de diámetro, asegurándola con 4 pernos a una estructura ya existente en el sitio de medición. Esta tubería proporciona protección y estabilidad para los sensores en el entorno del flujo de agua.
- ✓ **Instalación de los sensores:** Los sensores solinst Levelogger y barologger previamente configurados y calibrados fueron colocados en el interior de la tubería. Se utilizaron cables para fijar los sensores dentro de la tubería, asegurando que permanezcan en una posición adecuada y estable para registrar los niveles de agua de manera precisa.

Este procedimiento garantiza que los sensores estén protegidos de impactos directos y condiciones adversas, permitiendo una captura de datos continua y confiable.

Figura 2.2

Instalación de los sensores de nivel de agua



Nota: Tomo fotográfico de la instalación de los sensores.

Figura 2.3

Estación hidrométrica de Luricocha



Nota: Tomo fotográfico de la estación de los sensores de nivel agua.

2.4.1.3 Aforos con correntómetro

Para el aforo con correntómetro, primero se fijó dos estacas uno en el margen derecho y el otro en el margen izquierdo, ubicado en el punto de control establecido anteriormente, estas estacas serán punto de referencia donde se va tender la wincha y medir el ancho y la profundidad; luego se preparó y calibró el equipo para asegurar la precisión de las mediciones de velocidad. La sección se dividió en intervalos a lo largo del ancho del río para cubrir toda la variabilidad en el flujo. En cada intervalo, se midió la profundidad y la velocidad del agua en diferentes puntos, generalmente al 20%, 60%, y 80% de la profundidad, o al 60% en zonas poco profundas.

Las velocidades y profundidades se registraron cuidadosamente para cada intervalo. Posteriormente, se calcula el caudal de cada segmento utilizando la fórmula $Q_1=A_1 \times V_1$, donde A_1 es el área del intervalo y V_1 la velocidad promedio. La suma de estos caudales parciales proporcionó el caudal total (Q_t) de la sección. Este método permitió obtener un valor preciso y representativo del flujo en la sección de aforo, siendo fundamental para los análisis hidrológicos en la investigación.

Figura 2.4

Establecimiento del punto de aforo



Nota: Colocación de puntos fijos (estacas de acero) en ambos márgenes del río

Figura 2.5

Medición de los tirantes en la sección control.



Nota: Tomo fotográfico de la medición de los tirantes del río.

Figura 2.6

Aforo con correntómetro estación Luricocha



Nota: Tomo fotográfico del desarrollo del aforo con correntómetro.

2.4.1.4 Aforo con flotador

El procedimiento de estudio para el aforo mediante el método de flotador se realizó en los siguientes pasos.

Primero se seleccionó una sección recta y representativa del cauce, donde el flujo sea lo más uniforme posible y con una profundidad y ancho adecuados para facilitar la medición. En esta sección, se midió y marcó una distancia de 5.90m, la cual fue el tramo más representativo y estable del río. Una vez definido el tramo se midió las profundidades a cada 20cm de ancho del río, con estos datos se determinó el área de la sección transversal.

Se colocó un flotador (una bola de Tecnopor) en la superficie del agua al inicio del tramo. Se registro el tiempo que tarda el flotador en recorrer la distancia marcada hasta el final del tramo, utilizando un cronómetro. Este proceso se repitió varias veces para obtener una velocidad promedio. La velocidad superficial obtenida se ajustó con un coeficiente de corrección (K_c) para aproximarla a la velocidad media del flujo. Finalmente, el caudal se calculó multiplicando esta velocidad media ajustada por el área de la sección transversal del río en el tramo de aforo.

Figura 2.7

Medición de las profundadas a lo largo del ancho del río.



Nota: Tomo fotográfico de la medición de los tirantes del río.

Figura 2.8

Registro del tiempo recorrido por el flotador.



Nota: Tomo fotográfico del desarrollo del aforo con flotador.

2 4.1.5 Aforo con trazador químico o dilución

El procedimiento de aforo por dilución en este estudio se realizó en varios pasos cuidadosamente planificados para garantizar la precisión de las mediciones.

Primero, se llevó a cabo la calibración del río, que consistió en obtener la relación entre la concentración de sal y la conductividad del agua. Para ello, se tomó una muestra de 20 litros de agua del río en un recipiente limpio (balde). A continuación, se midió la conductividad base de esta muestra antes de añadirle sal. Luego, se agregaron 5 gramos de sal y se removió la solución hasta que la sal esté completamente disuelta, tras lo cual se volvió a medir la conductividad. Este proceso de adición de 5 gramos de sal y medición de conductividad se repitió cinco veces, con el objetivo de obtener una serie de datos que, al graficarse, produzcan una línea recta. Esta relación entre salinidad y conductividad permitió interpretar las mediciones de campo.

Figura 2.9

Medición de los 5 gramos de sal para la calibración del río.



Nota: Tomo fotográfico de 5 gramos de sal común.

Figura 2.10

Calibración del río



Nota: Tomo fotográfico de calibración del río.

Como segundo paso, un personal preparó una solución con de 20 litros de agua y 4 kilogramos de sal. Esta solución se preparó aproximadamente 80 metros aguas arriba del punto de control para permitir una adecuada dispersión en el flujo. Una vez que la sal está completamente disuelta, la solución se vertió de manera instantánea en el cuerpo de agua para crear una concentración detectable en el punto de control.

Figura 2.11

Preparación de la solución de 20 litros de agua y 4 kilogramos de la sal común.



Nota: Tomo fotográfico de la preparación de la solución para el aforo con dilución.

Finalmente, en el punto de control, otro personal registró las variaciones de conductividad a intervalos de un segundo. Este registro continuo de la conductividad permitió calcular el caudal a partir de la dilución de la sal en el flujo, usando la relación establecida en la calibración inicial.

Figura 2.12

Medición de la conductividad en el punto de aforo.



Nota: Tomo fotográfico de del aforo con dilución.

2.4.1.6 Aforo con video-cámara

El procedimiento de aforo mediante video-cámara en este estudio se realizó en varios pasos para asegurar la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.

Paso 1: Se seleccionó un tramo representativo del cauce, este tramo es el mismo que se utilizó para las determinar el área de la sección transversal del río en los aforos de las otras metodologías, asegurándose de que tuviera buena visibilidad y condiciones de flujo uniformes para facilitar el análisis.

Paso 2: Ubicación de los puntos de control, se pintó 4 puntos de control, 2 puntos en el margen derecho y otros 2 puntos en el margen izquierdo, se procedió a medir las distancias entre los 4 puntos de control, estas referencias visuales nos permitieron ortorectificar las imágenes capturadas y mejorar la precisión en el cálculo de las velocidades de flujo.

Figura 2.13

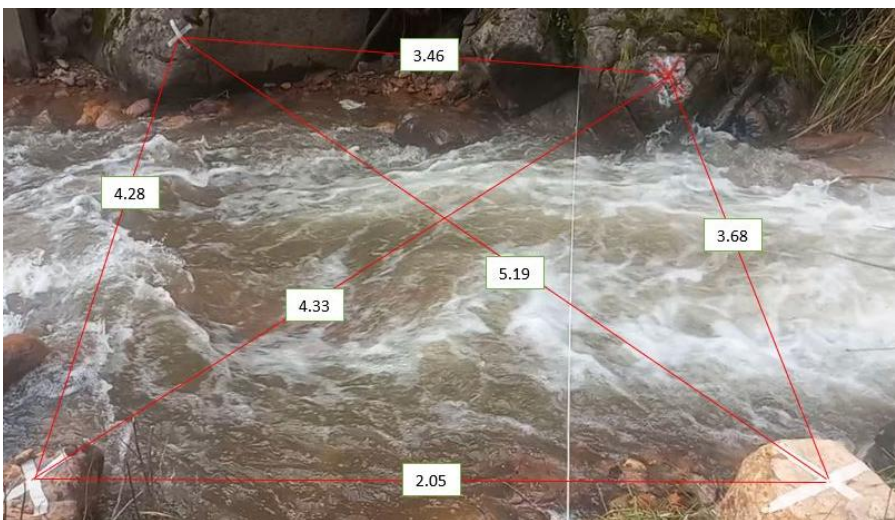
Puntos de control para la orto rectificación



Nota: Tomo fotográfico de los puntos de control para el aforo con videocámara.

Figura 2.14

Medición de los puntos de control.



Nota: Tomo fotográfico de distancia entre los puntos de control.

Paso 3: Se colocó la video-cámara en una posición elevada y estable, con un ángulo que capturara toda la sección transversal del cauce. La cámara fue ajustada para grabar en alta resolución y a una velocidad de fotogramas adecuada para captar los movimientos del flujo en detalle. Durante el periodo de grabación, se registraron las condiciones del punto de control, como el nivel de agua en la estación, condiciones del río y la hora de grabación.

Figura 2.15

Grabación del video



Nota: Tomo fotográfico del aforo con videocámara.

2.4.1.7 Descarga de datos de la estación hidrométrica

La descarga de datos fue un proceso esencial para el análisis de los datos hidrológicos. Este procedimiento involucra la obtención de la data bruta de niveles de agua y la presión atmosférica.

Figura 2.16

Retiro de los sensores para la descarga de datos



Nota: Tomo fotográfico de descarga de datos.

Figura 2.17

Descarga de datos de Levellogger y Barologger



Nota: Tomo fotográfico de descarga de datos.

2.4.2 Trabajo de gabinete

2.4.2.1 Análisis y tratamiento de la data bruta descargada de la estación hidrométrica.

a) Compensación de los niveles de agua.

La compensación barométrica de datos y el ajuste del parámetro se realizó usando el software del Levellogger. La lectura del Levellogger se ajustó utilizando los datos de Barologger, que mide la presión atmosférica. Esto se hace para corregir las diferencias debidas a la altitud y permitir una data más precisa del nivel de agua.

b) Análisis de datos anormales y corrección

Una vez compensados los niveles de agua, se procedió al análisis visual de los datos anormales. Este análisis incluyó las mediciones atípicas que se diferencian significativamente de los valores esperados, picos o caídas abruptas que no corresponde a eventos hidrológicos naturales y los datos faltantes o registro de saltos irregulares.

La corrección de datos implicó sustitución de los valores anómalos por datos estimados mediante la interpolación, eliminación de registros claramente erróneos y finalmente la validación de la serie de niveles de agua.

2.4.2.2 Aforos con correntómetro

Una vez realizados los aforos en campo utilizando el correntómetro, el siguiente paso fue procesar los datos obtenidos para determinar el caudal del río. Este proceso se llevó a cabo mediante el uso de una hoja de cálculo en Excel. A continuación, se detallan los pasos principales de este procedimiento:

- a) **Registro de Datos Brutos:** Se registraron los datos obtenidos en campo, que incluyen la velocidad del agua medida en diferentes secciones transversales y la profundidad en cada punto de medición. Cada sección se identificó con su correspondiente distancia respecto al inicio del tramo de aforo.
- b) **Cálculo de Áreas Parciales:** Se dividió la sección transversal del río en subsectores, y se calculó el área de cada subsector.
- c) **Determinación del Caudal Parcial:** Para cada subsector, se multiplicó el área parcial por la velocidad medida del vertical. Este paso se repite para todos los subsectores.
- d) **Cálculo del Caudal Total:** Se sumó los caudales parciales de todos los subsectores para obtener el caudal total del tramo aforado.
- e) **Análisis de Consistencia de Datos:** Se realizó un control de calidad de los datos, verificando la coherencia de las mediciones y asegurando que no haya errores evidentes, como mediciones atípicas que puedan influir en el resultado final.

Se realizó la representación gráfica de tablas y ajuste de curvas de calibración del nivel de agua con el caudal correspondiente, esto facilitó la interpretación y presentación de los resultados.

El uso de Excel permitió automatizar muchos de estos cálculos mediante fórmulas, gráficos y herramientas de análisis de datos, lo que mejoró la precisión y eficiencia del procesamiento de los aforos. Este procesamiento adecuado garantizó que los datos finales de caudal sean representativos de las condiciones hidrológicas del tramo estudiado.

2.4.2.3 Aforos con flotador

Después de realizar los aforos de campo mediante el uso de flotadores para medir la velocidad superficial del agua, el procesamiento de estos datos se llevó a cabo en una

hoja de cálculo Excel para determinar el caudal total del río. A continuación, se detallan los pasos para el procesamiento:

a) Ingreso de Datos Brutos

Se registran los datos de campo en Excel, que incluyeron la distancia recorrida por el flotador, el tiempo que tarda en cubrir esa distancia y la longitud de la sección transversal del río en el punto de aforo. Estos datos fueron revisados cuidadosamente para evitar errores de transcripción.

b) Cálculo de la Velocidad Promedio

Se calculó la velocidad superficial promedio dividiendo la distancia recorrida por el flotador entre el tiempo empleado en cada medición. Este paso se repitió para todas las mediciones realizadas en distintas partes de la sección transversal.

c) Aplicación del Coeficiente de Corrección

Debido a que el flotador mide la velocidad superficial, fue necesario aplicar un coeficiente de corrección (k_c) para estimar la velocidad promedio del flujo en toda la sección. Esta corrección tiene en cuenta que la velocidad del agua en la superficie es mayor que la velocidad promedio a lo largo de la profundidad del río.

$$Kc = \frac{Vm}{Vs} \quad (16)$$

Donde: Kc : Coeficiente de corrección de velocidad superficial, Vm : Velocidad media del correntómetro y Vs : Velocidad superficial del flotador

d) Cálculo de Áreas Parciales

La sección transversal del río se dividió en subsectores, y se calculó el área de cada uno, la longitud de cada subsector se multiplica por la profundidad correspondiente para obtener el área parcial.

e) Determinación del Caudal Parcial y Total

Para cada subsector, se multiplicó el área parcial por la velocidad promedio corregida para obtener el caudal parcial, la suma de los caudales parciales proporciona el caudal total del tramo aforado.

f) Análisis de Consistencia de Datos

Se realizó una revisión de la coherencia de las mediciones, verificando que las velocidades y caudales parciales sean razonables y que no haya valores atípicos que distorsionen el resultado. Se graficó los datos para detectar anomalías visualmente y asegurar una distribución lógica a lo largo de la sección.

2.4.2.4 Aforo con trazador químico o dilución

Tras realizar los aforos de campo utilizando el trazador químico o dilución (sal), los datos se ordenaron en una hoja Excel para luego procesar y calcular el caudal en el software SolutionNaCl. A continuación, se detallan los pasos del procesamiento:

Tabla 2.1

Ordenado de Datos de Calibración

Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Concentración de sal (mg/L)
311	0
854	250
1369	500
1893	750
2410	1000
2916	1250

Fuente: Datos de calibración del río.

Tabla 2.2

Ordenado de Datos de Aforo

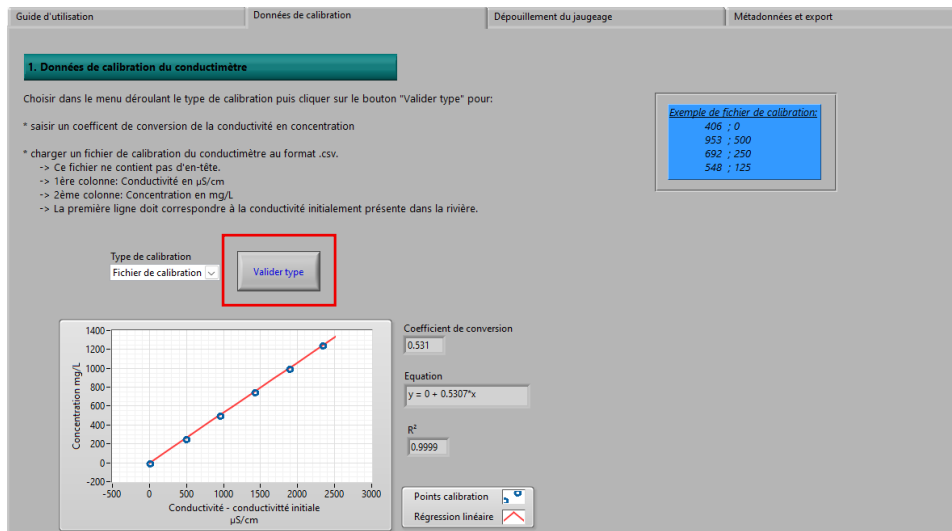
Intervalo de tiempo (S)	Conductividad registrada ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	314
2	314
:	:
.	.
n	314

Fuente: Datos de aforo del río.

Una vez ordenado los datos en formato Excel delimitado por comas, se abre el software SolutionNaCl, se procedió con la importación de datos de calibración. Abrimos la ventana données de calibration, le damos clic en el botón valider type, direccionamos nuestro archivo con los datos de calibración previamente ordenado, el programa nos muestra la gráfica de los datos ingresado.

Figura 2.18

Importación de datos calibración al software SolutionNaCl.

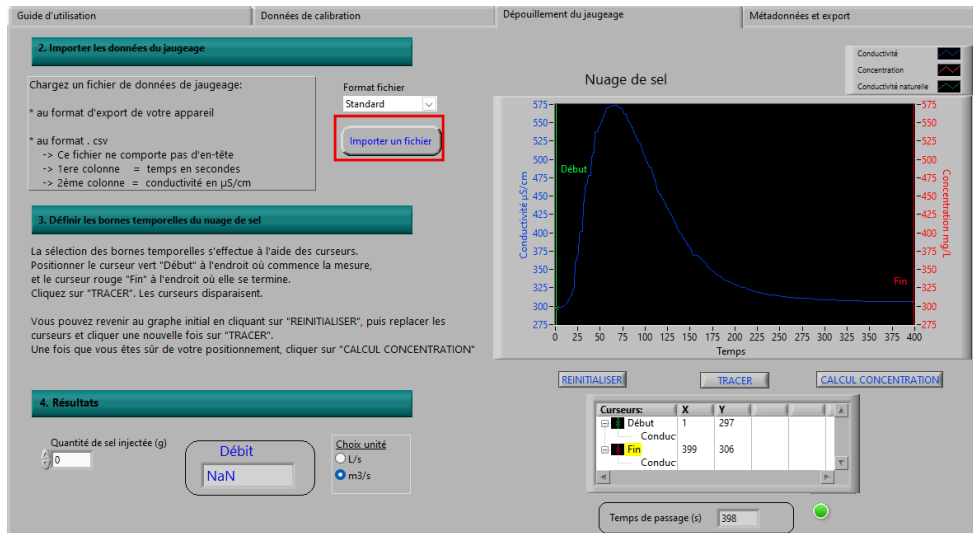


Fuente: Datos de calibración importados al software SolutionNaCl.

Procedemos con la importación de datos de aforo, abrimos la ventana Dépouillement du jaugeage, le damos clic en el botón importer un fichier y el programa nos muestra la gráfica con los datos ingresado.

Figura 2.19

Importación de datos de aforo al software SolutionNaCl.

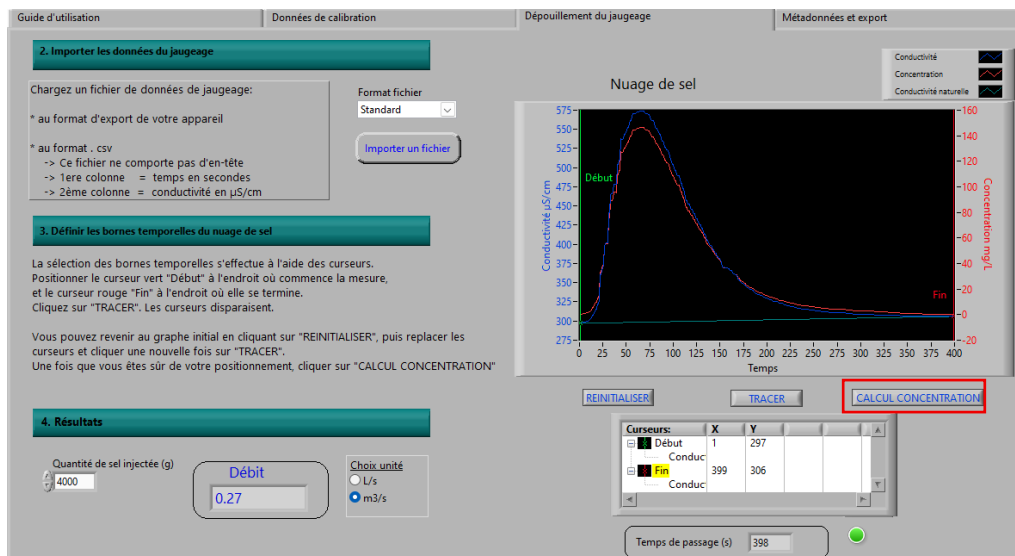


Fuente: Datos de aforo importados al software SolutionNaCl.

Finalmente, en la parte de resultados digitamos la cantidad de sal utilizado en gramos en este caso se utilizó 4 kilogramos de sal (4000gr), luego le damos en el botón de calcul concentration y el programa nos muestra el resultado de caudal aforado para ese día.

Figura 2.20

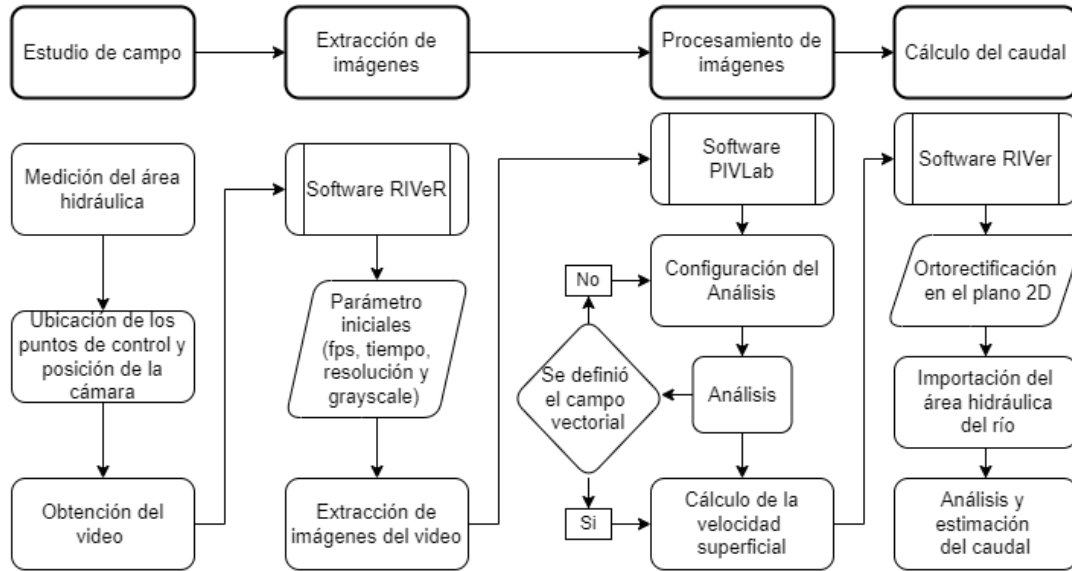
Generación del caudal en el software SolutionNaCl.



Fuente: Resultado del caudal generado con el software SolutionNaCl.

2.4.2.5 Aforo con video-cámara

Después del trabajo de campo, los datos obtenidos se procesaron utilizando las aplicaciones de PIVLab (herramienta de Matlab) y el RIVeR. A continuación, se detallan los pasos del procesamiento:

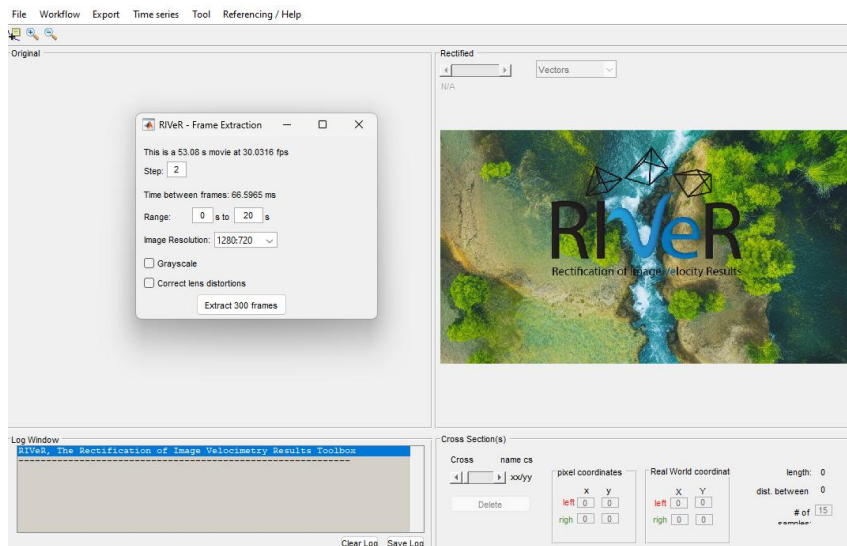


Nota: Diagrama de flujo para el procesamiento del método videocámara

Paso 1. Extracción de las imágenes a partir del video generado en campo e importación de las imágenes extraídas al software PIVlab.

Figura 2.21

Extracción de las imágenes a partir del video generado en campo.

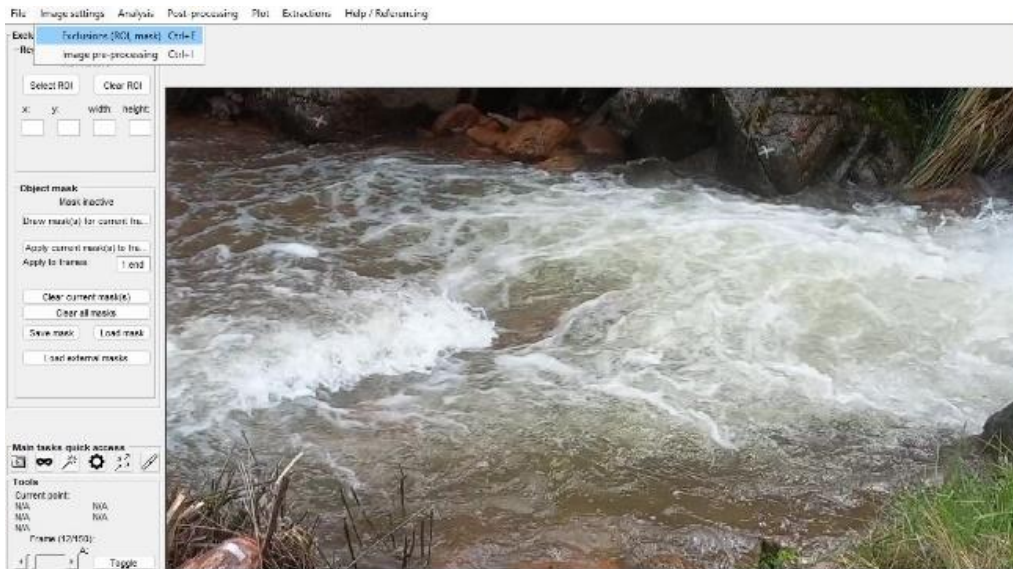


Nota: Extracción de imágenes con el software RIVeR.

Paso 2. Demarcación del área del interés en todas las imágenes

Figura 2.22

Demarcación del área del interés en las imágenes

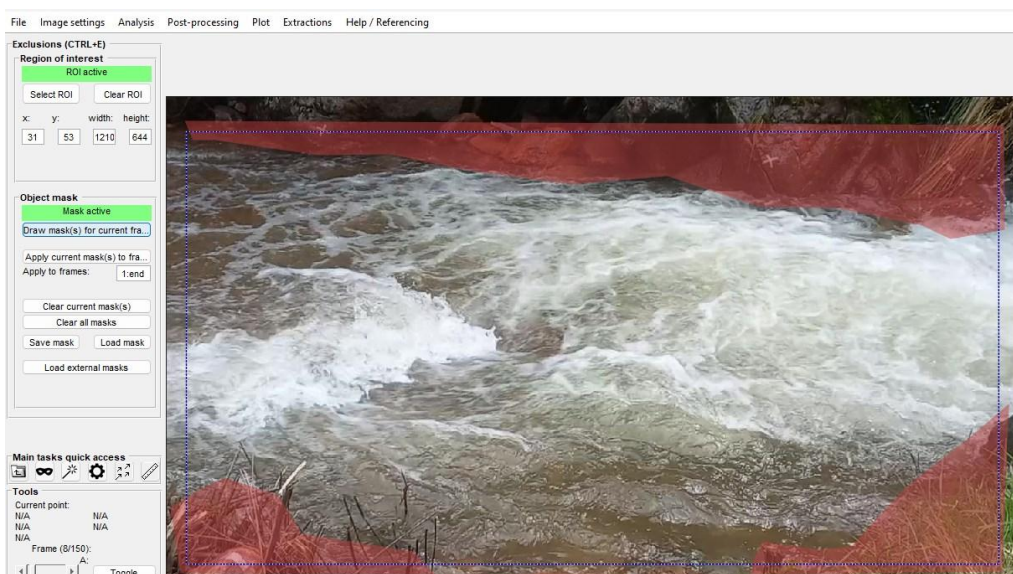


Nota: Procesamiento de las imágenes al software PIVlab.

Paso 3. Selección de mascara en el área de interés

Figura 2.23

Selección de mascara en el área de interés

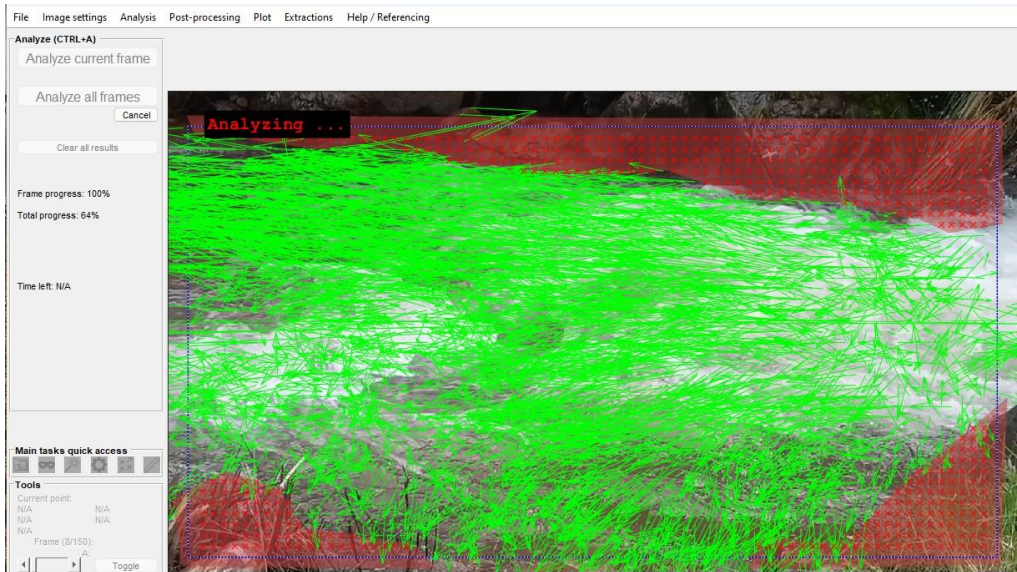


Nota: Procesamiento de las imágenes al software PIVlab.

Paso 4. Generación de los vectores de velocidad

Figura 2.24

Generación de los vectores de velocidad

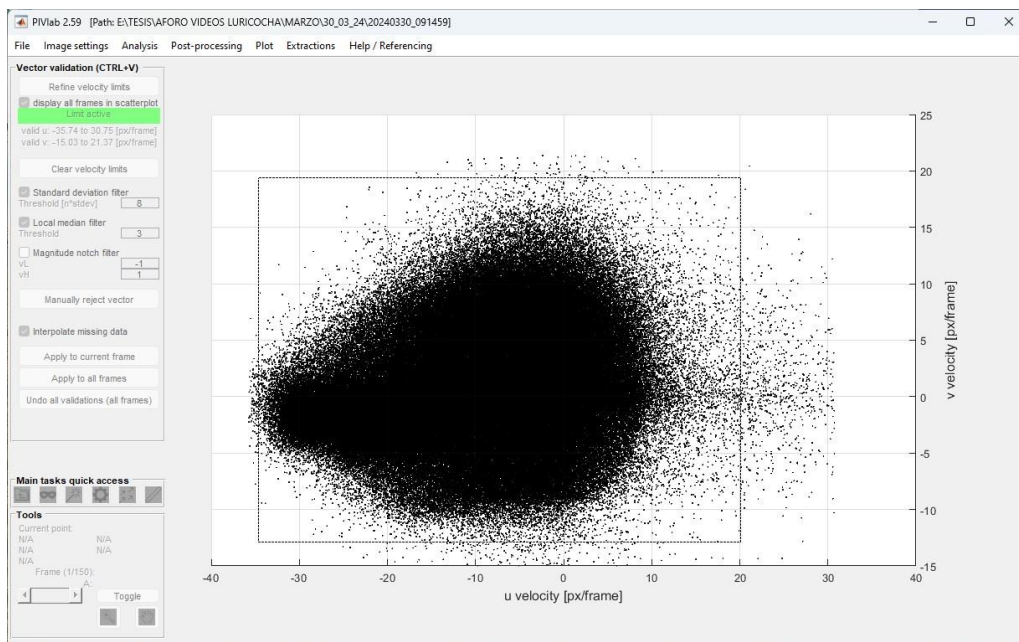


Nota: Procesamiento de las imágenes al software PIVlab.

Paso 5. Selección del área densa con la nube de puntos de vectores

Figura 2.25

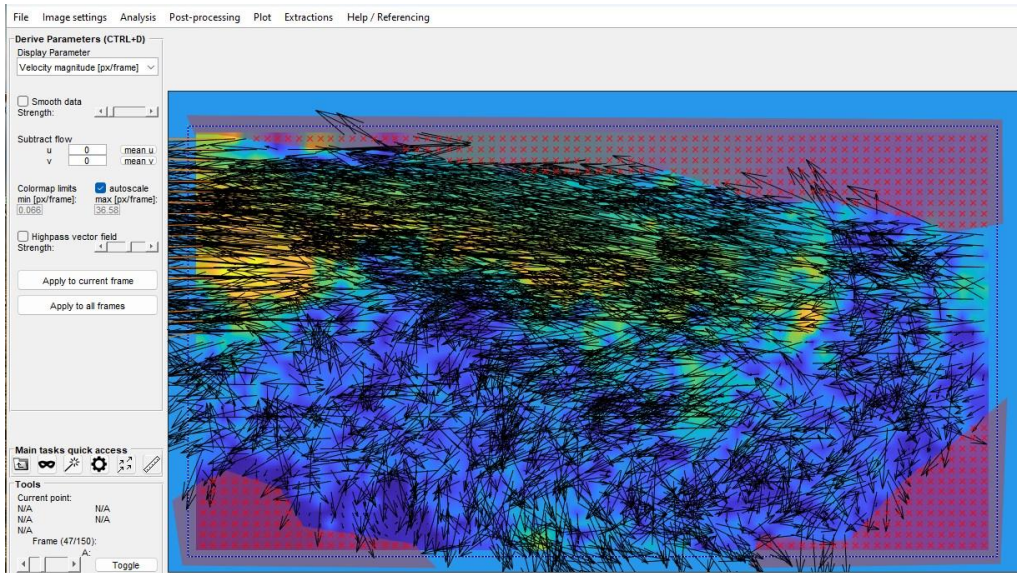
Selección del área densa con la nube de puntos de vectores.



Nota: Procesamiento de las imágenes al software PIVlab.

Figura 2.26

Resultado del procesamiento con PIVlab

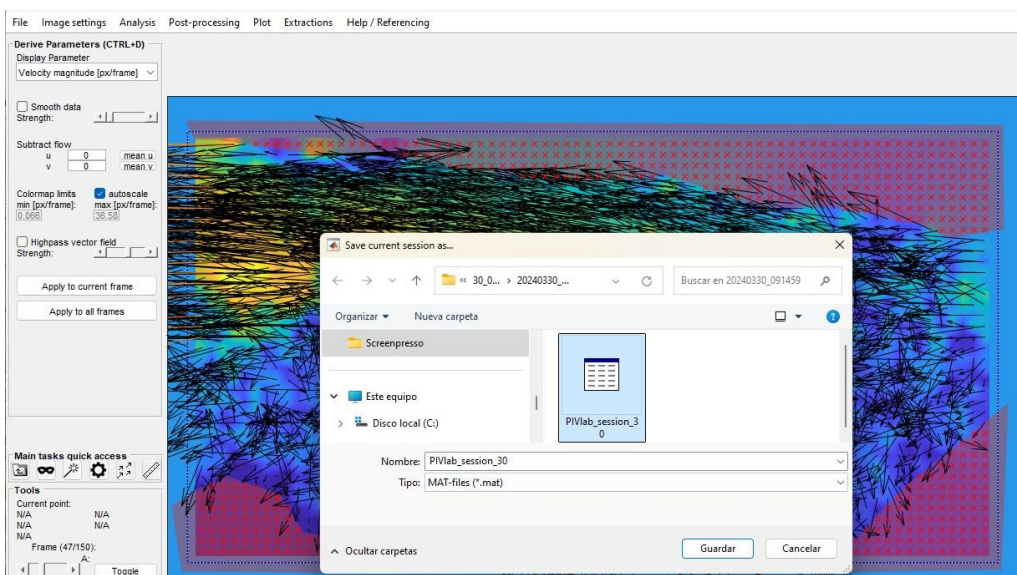


Nota: Procesamiento de las imágenes al software PIVlab.

Paso 6. Se guardó el resultado dentro de la carpeta de trabajo con un nombre específico.

Figura 2.27

Guardado del resultado del procesamiento con PIVlab

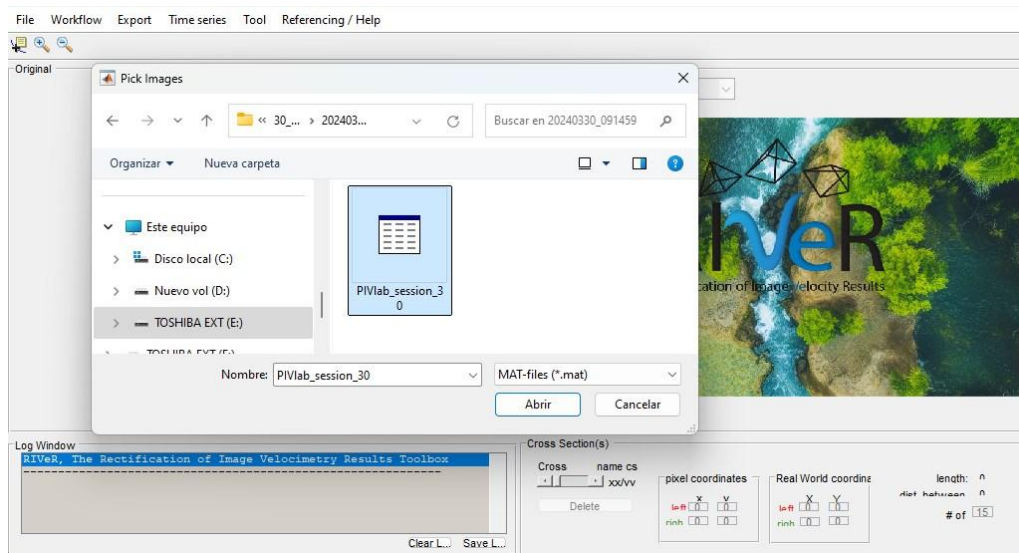


Nota: Resultado del procesamiento de las imágenes al software PIVlab.

Paso 7. Regresamos al interfaz de RIVeR y seleccionamos el resultado de PIVlab.

Figura 2.28

Importación del archivo resultado del PIVlab

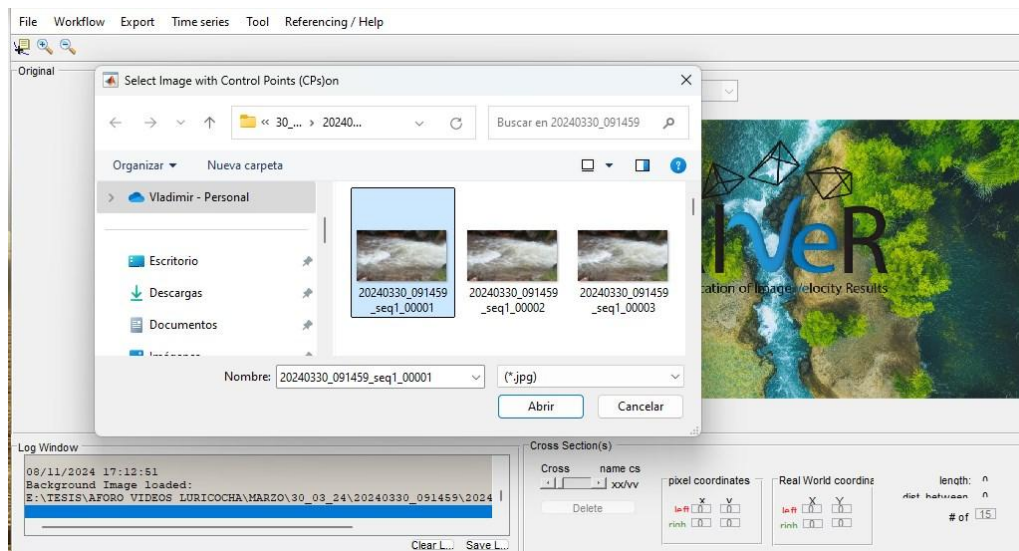


Nota: Importación del resultado del procesamiento de las imágenes al software RIVeR.

Paso 8. En la misma pestaña, se importó la imagen donde se va trazar los puntos de control.

Figura 2.29

Importación de la imagen donde se va trazar los puntos de control

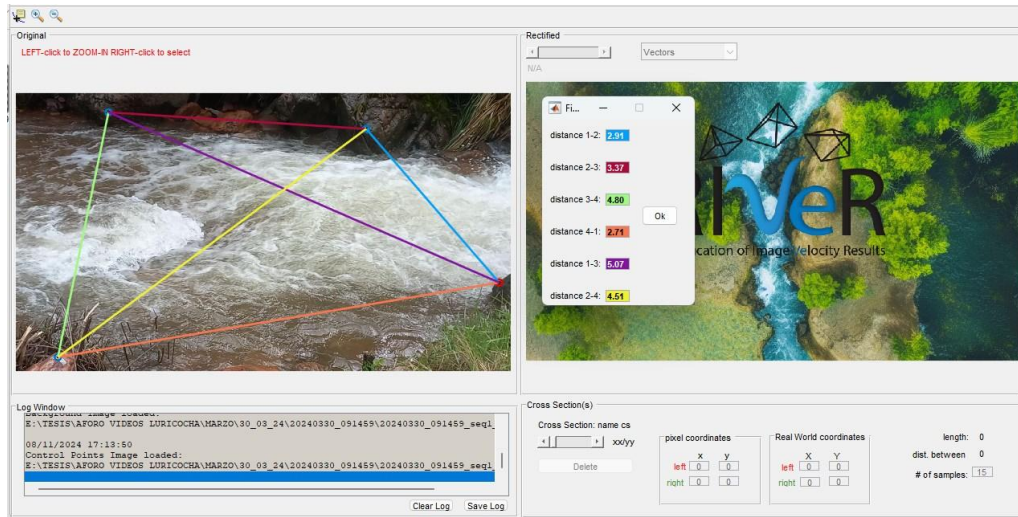


Nota: Procesamiento de datos en el software RIVeR.

Paso 9. Se seleccionaron los 4 puntos de control, luego se procedió a ingresar las distancias entre los 4 puntos.

Figura 2.30

Ubicación de los puntos de control e importación de las medidas.

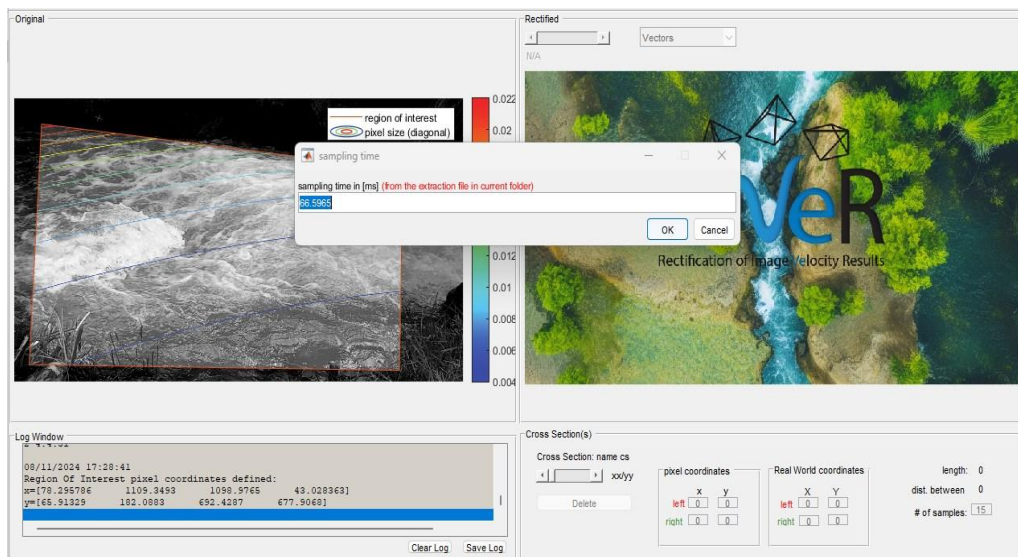


Nota: Procesamiento de datos en el software RIVER.

Paso 10. Se seleccionó el área de interés donde se va presentar los vectores resultantes

Figura 2.31

Seleccionado del área de interés

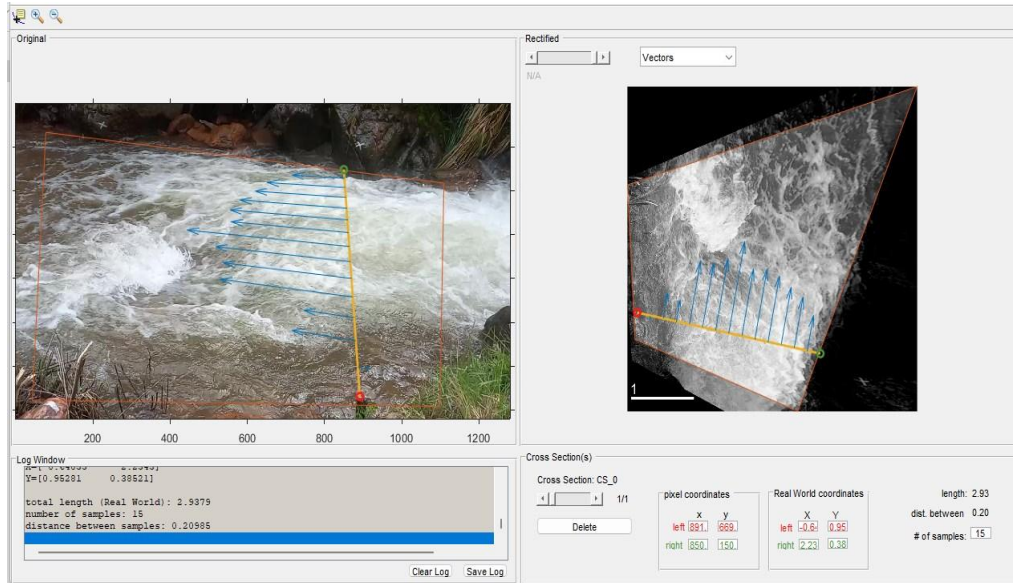


Nota: Procesamiento de datos en el software RIVER.

Paso 11. Generación de los vectores resultantes

Figura 2.32

Generación de los vectores resultantes



Nota: Procesamiento de datos en el software RIVE.

Paso 12. Finalmente importamos la sección transversal medido en campo en formato.csv, ingresamos el nivel de agua registrado para esa hora de aforo y el coeficiente de corrección de velocidad (K_c), le damos en el botón de Compute y software automáticamente nos genera el caudal correspondiente.

2.4.2.6 Procesamiento y análisis de la información hidrológica con Hydraccess

La información hidrológica recopilada en la estación hidrométrica fue incorporada a una base de datos del software Hydraccess. Los datos ingresados fueron caudales instantáneos de correntómetro, trazador químico, flotador y videocámara, y cotas instantáneas.

a) Procesamiento de aforos con correntómetro

Una vez importado la base de datos al software Hydraccess, en la pestaña HIDRO, Aforos y Procesamiento de aforos, en esta nueva ventana abrimos la pestaña de Hélices y se configuró los parámetros de ajuste para el correntómetro BFM-801, luego se ha digitalizado las mediciones diarias realizadas con el correntómetro, estos datos incluyeron distancia, profundidad y número de revoluciones.

Figura 2.33

Configuración del Hydraccess para correntómetro electromagnético

Administración de las Hélices

Orden: 001

Hélice: BFM-801 Descripción: Correntómetro Electromagnetico OTT-MFPRO

Paso: 0.001

a1: 0.001 b1: 0

Límite 1: a2: b2:

Límite 2: a3: b3:

Primera Última

Anterior Siguiete

Suprimir Añadir

Importar desde HYDROM 2 Cerrar

Nota: Procesamiento de datos con Hydraccess.

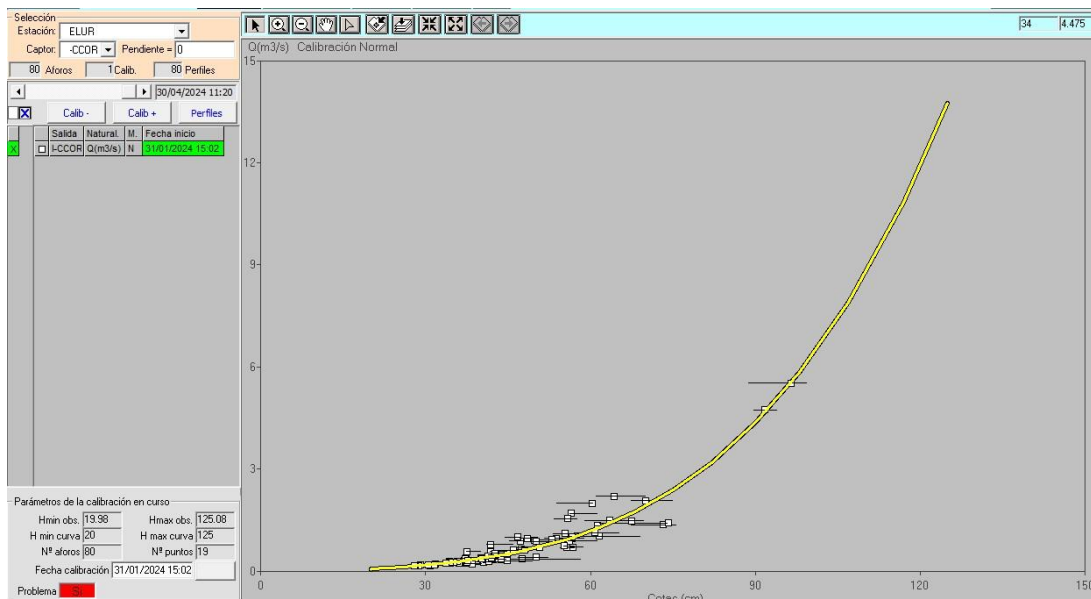
Una vez digitalizado los datos de campo se verificó los perfiles de velocidades para cada vertical y también los caudales específicos con respecto a la profundidad.

b) Generación de curvas de gasto

Una vez procesado los aforos se procedió con la generación de curva de gasto para cada metodología.

Figura 2.34

Curva de gasto para el método correntómetro



Nota: Procesamiento de datos con el software Hydraccess.

c) Perfiles batimétricos

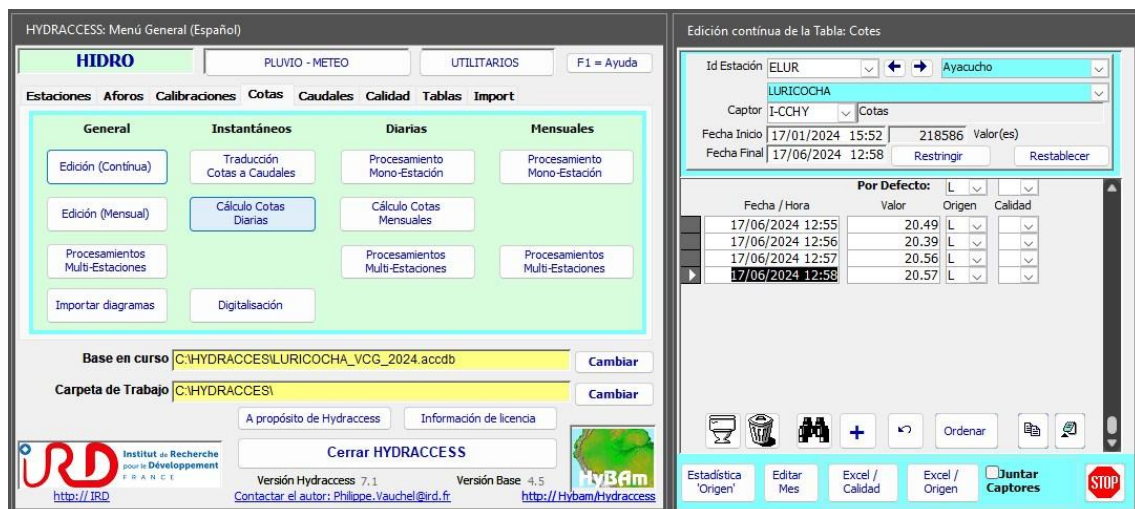
Los perfiles batimétricos se obtuvieron mediante la función “Importar los perfiles desde los procesamientos de aforo con molinete” en el botón editar perfiles. La figura muestra los perfiles batimétricos históricos de la sección del río Luricocha, que fueron obtenidos mediante los aforos con correntómetro.

d) Registro de cotas

Una vez generado y establecido la curva de gasto se ingresó la serie de cotas o niveles instantáneos utilizando la pestaña “Cotas”- “Edición (continua)”

Figura 2.35

Registro de cotas para la generación de caudales



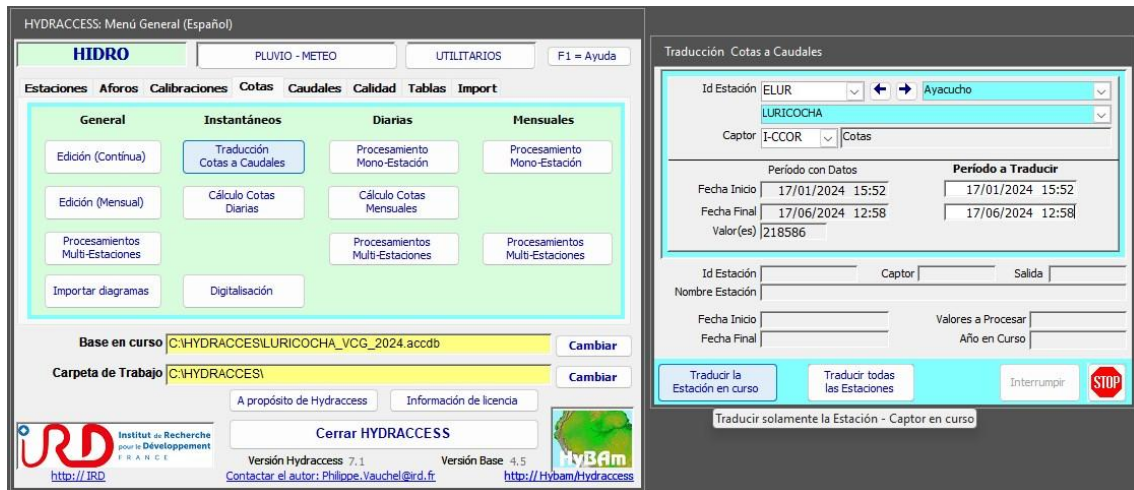
Nota: Registro de cotas en el software Hydraccess 7.1.

e) Generación de serie de caudales a partir de serie de niveles y curva de gasto

Ingresado los registros de cotas históricas o serie de niveles, se generó los caudales instantáneos en la pestaña “cotas” con la función “Traducción Cotas a Caudales”. La calidad de los caudales obtenidos con el software Hydraccess dependerá directamente de la calidad de los datos ingresados en la interfaz gráfica (curva de gasto y cotas).

Figura 2.36

Generación de serie de caudales



Nota: Generación de caudales en el software Hydraccess 7.1.

2.4.3 Análisis y evaluación de incertidumbre global

$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

2.4.3.1 Evaluación de la incertidumbre de las mediciones de descarga

$$\varepsilon_1 = \sqrt{X_A^2 + \frac{1}{m} (X_e^2 + X_c^2 + X_b^2 + X_d^2 + X_p^2)}$$

X_A: Error debido a la elección del número de puntos en una vertical

Tabla 2.3

Error por el número de verticales medidos

Método	X _A (%)
Más de 2 puntos	0.5
2 puntos	3
1 punto (0.6 de profundidad)	3.5

Fuente: (Herschly, 1970)

X_e: Error debido a la elección de la duración de exposición del molinete.

Para un tiempo de exposición de 40 segundos o 100 cuentas aproximadamente, la recomendación es ± 6 por ciento.

X_b: Error en la medición del ancho.

Normalmente despreciables y se sugiere un valor de $\pm 0,50$ por ciento.

X_d: Error en la medición de la profundidad

- ✓ Para valores grandes de profundidad $\pm 1\%$
- ✓ Para tirantes poco profundas $\pm 3\%$

X_p: Error debido a la cantidad de verticales

Tabla 2.4

Error debido a la cantidad de verticales

M (número de verticales)	X_p (%)
8	± 5
15	± 3
50	± 1

Fuente: (Herschly, 1970)

2.4.3.2 Evaluación de la incertidumbre de descarga en las curvas de clasificación de caudal por etapas.

$$\epsilon_2 = [(Q_o - Q_{rc})/Q_{rc}]$$

Donde: Q_o : Caudal observado y Q_{rc} : Caudal generado con la curva de gasto.

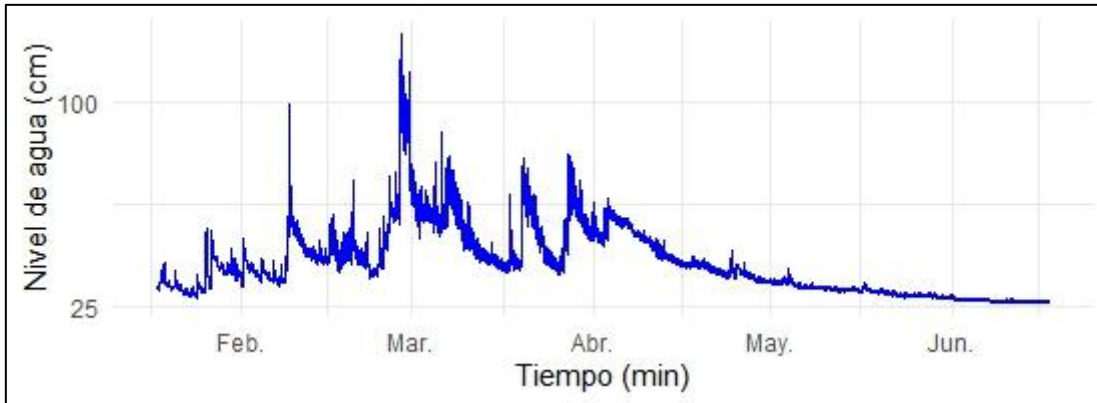
Para cuantificar esta incertidumbre y asegurar que las mediciones se encuentren dentro de un rango aceptable de precisión, se trabajó con la norma europea ISO EN 748 (1997) que ofrece una metodología estandarizada. Esta norma describe los procedimientos para evaluar y calcular los errores inherentes en las mediciones de caudal, proporcionando un marco que permite cuantificar estos errores con un nivel de confianza del 95%.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Análisis de serie temporal de niveles de agua

Figura 3.1

Serie temporal de niveles de agua



Nota: serie temporal de niveles de agua para el periodo de monitoreo

La gráfica presentada (figura 3.1.) muestra la evolución temporal del nivel de agua, del río Luricocha durante el periodo comprendido entre el 17 de enero y el 17 de junio del 2024. En este intervalo, se registraron un total de 218,586 mediciones de los niveles de agua a una escala temporal de un minuto, lo que permite un análisis detallado de las dinámicas hidrológicas del río.

En el periodo húmedo, febrero a marzo, se observa un incremento notable en los niveles de agua, con picos que superan los 120 cm, asociados a lluvias intensas propias de la temporada de precipitaciones en esta región, lo que genera una alta dinámica hidrológica caracterizada por crecidas abruptas y descensos rápidos. A partir de abril, los niveles máximos disminuyen gradualmente, con menor frecuencia de picos altos, y hacia mayo y junio se estabilizan en valores más bajos, cercanos a los 25 cm, evidenciando la transición hacia la temporada seca, un patrón típico de los ríos de alta montaña relacionados con el ciclo anual de precipitaciones.

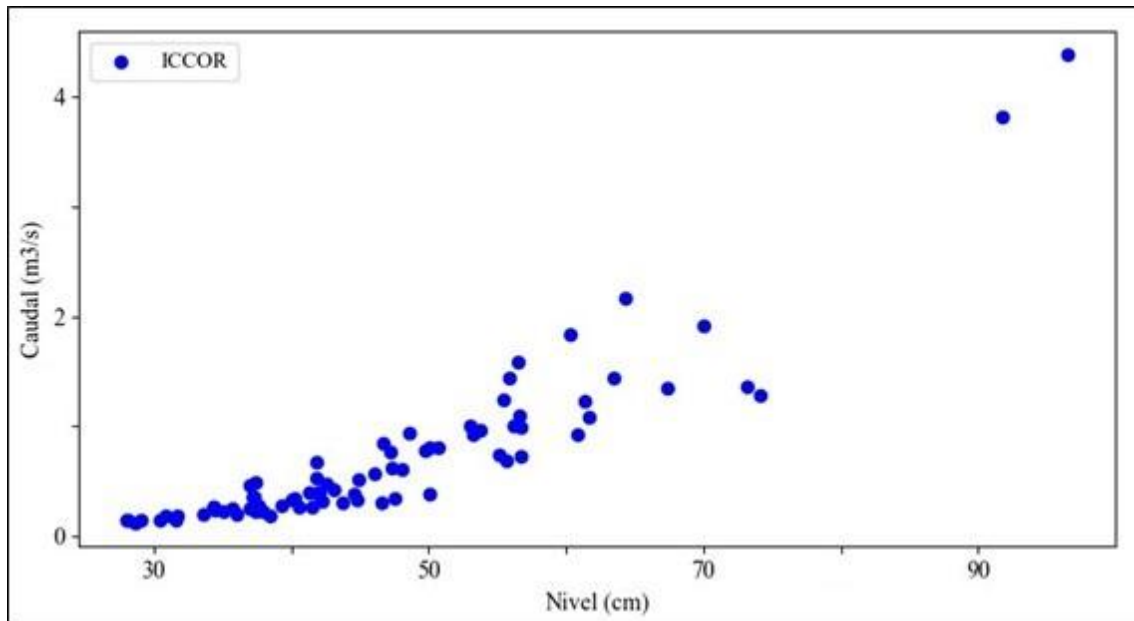
3.2. Estimación de aforos

3.2.1. Aforos con correntómetro

Los caudales estimados con correntómetro se detallan en la gráfica 3.2, mostrando las variaciones registradas en función de las condiciones observadas durante el monitoreo.

Figura 3.2

Diagrama de dispersión de aforos con correntómetro



Fuente: Elaboración propia con los datos del Instituto geofísico del Perú (IGP, 2024)

La Figura 3.2 muestra los resultados del monitoreo diario del caudal y nivel de agua en la estación Luricocha. Se registraron un total de 80 aforos con correntómetro realizados entre el 30 de enero y el 30 de abril de 2024. En el gráfico se observa que, para niveles inferiores a 55 cm, los datos presentan menor dispersión y mayor precisión; no obstante, a partir de dicho nivel, la dispersión se incrementa, lo que conlleva un aumento en la incertidumbre de las mediciones.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de curvas de predicción para el método de correntómetro, se aplicó el método Bootstrap con 1000 iteraciones para poder calcular un intervalo de predicción robusto y confiable.

Figura 3.3

Intervalo de predicción al 95% del método de correntómetro

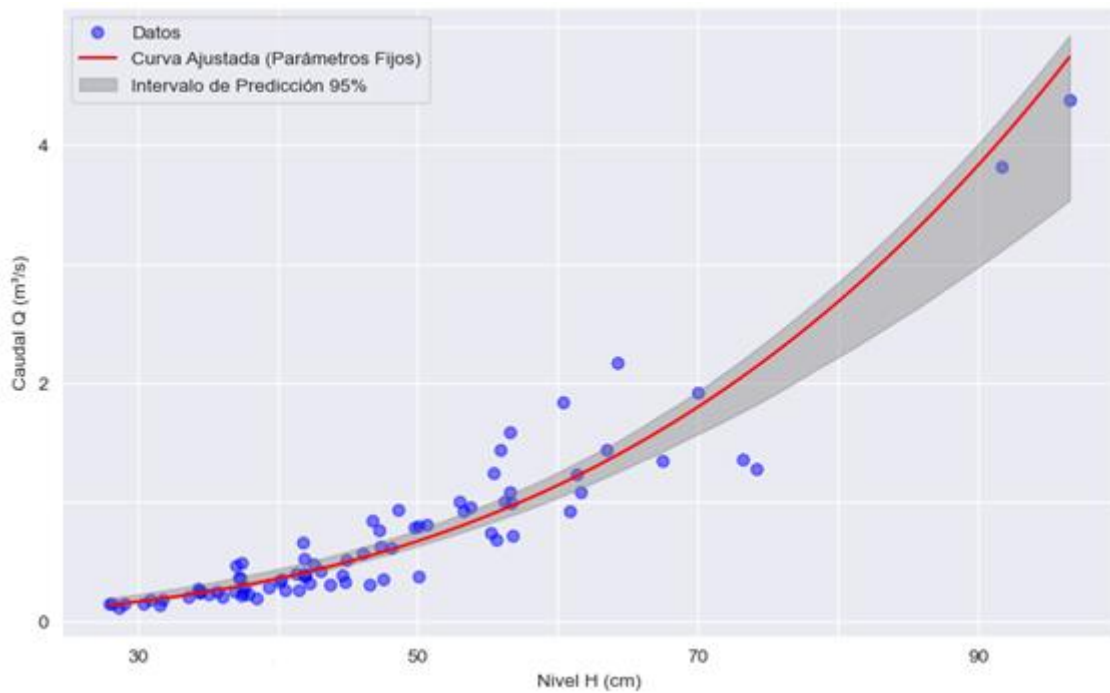


Tabla 3.1

Parámetros estadísticos para ICCOR

Parámetros	Valor
Exponente p	4.23
Error estándar de los residuos	0.27
Grados de libertad	77
Valor t (95% IC)	1.99

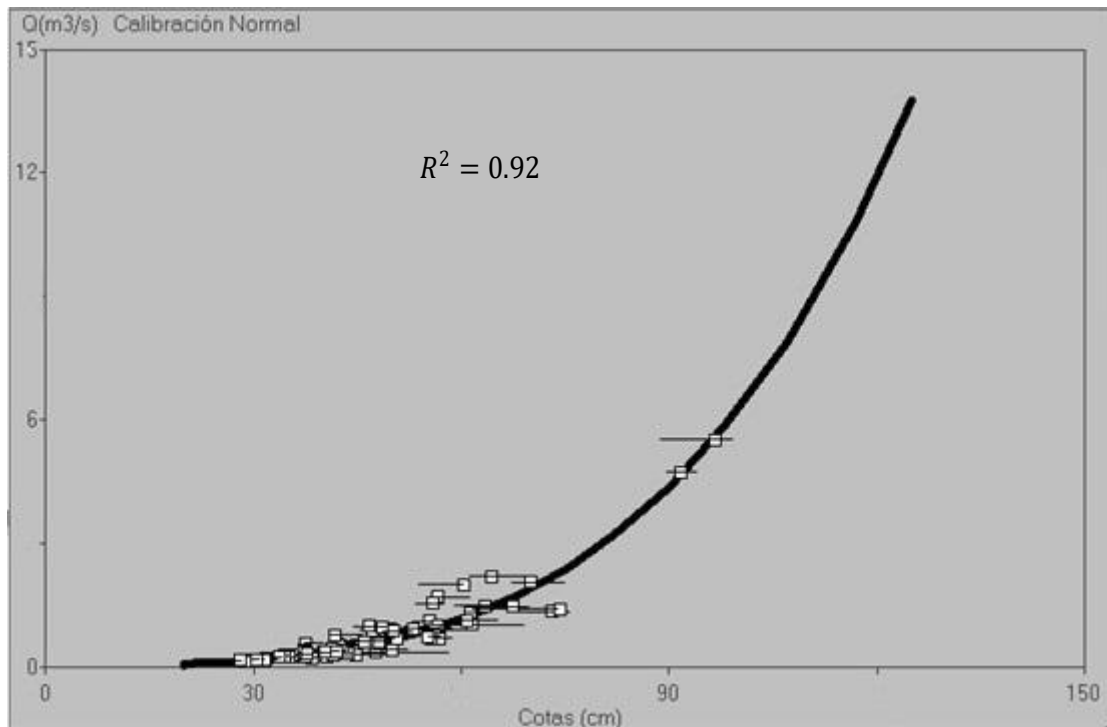
La gráfica 3.3 presenta un error estándar de los residuos: 0.27, indicando una dispersión moderada de los datos respecto al modelo, con grados de libertad 77, calculados como el número de observaciones menos el número de parámetros y un valor t de 1.99, utilizado para construir intervalos de confianza al 95%.

El área sombreada en gris indica el intervalo de predicción al 95% para el método del correntómetro, mostrando la confianza de las predicciones alrededor de la curva ajustada. La forma de la curva y la dispersión de los datos permiten evaluar la correspondencia entre el nivel y el caudal para los parámetros específicos considerados.

Intervalo de predicción (sombreado gris) indica el rango de incertidumbre asociado al modelo ajustado, con un nivel de confianza del 95%. Este intervalo es más estrecho en niveles intermedios (40-70 cm), donde los datos están más concentrados, y se amplía para los niveles altos, reflejando incertidumbres mayores a $1\text{m}^3/\text{s}$ en la predicción del modelo debido a la menor densidad de datos en esas regiones.

Figura 3.4

Curva gasto líquido de método del correntómetro



La figura 3.4 muestra la relación entre las cotas de agua (cm) y el caudal en (m^3/s) en el río Luricocha, obtenida mediante aforos realizados con el método de correntómetro y procesada con el software Hydraccess. Se observa que la relación entre el nivel de agua y el caudal es no lineal, característica de los ríos naturales. En niveles bajos de agua (cotas inferiores a 30 cm), los caudales son pequeños, mientras que a medida que el nivel del agua aumenta, el caudal crece exponencialmente, alcanzando valores superiores a $12\text{ m}^3/\text{s}$ para cotas mayores a 120 cm.

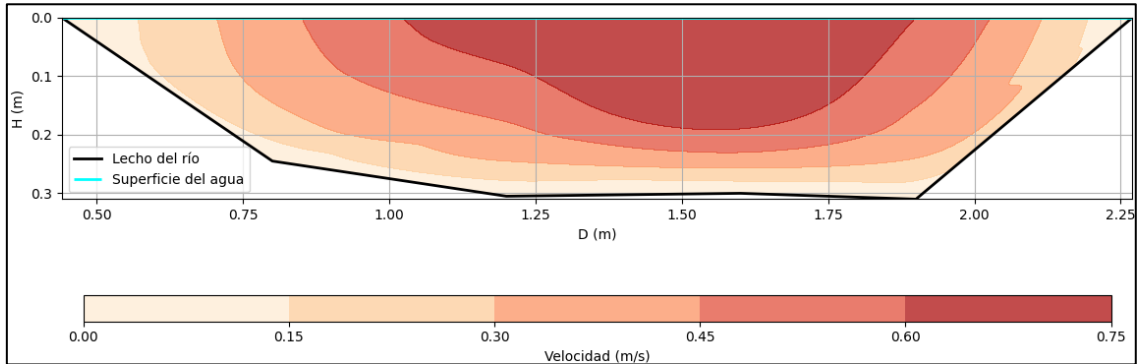
La línea negra continua indica el ajuste matemático de los datos medidos, mientras que los puntos y barras de error reflejan las mediciones individuales y la incertidumbre asociada. El coeficiente de determinación ($R^2=0.92$) demuestra un ajuste muy alto entre

los datos observados y el modelo. Este valor indica que el 92% de la variabilidad del caudal puede explicarse por las variaciones en el nivel del agua, lo cual respalda la robustez y confiabilidad del ajuste.

3.2.1.1. Análisis de las isotacas de los aforos con correntómetro

Figura 3.5

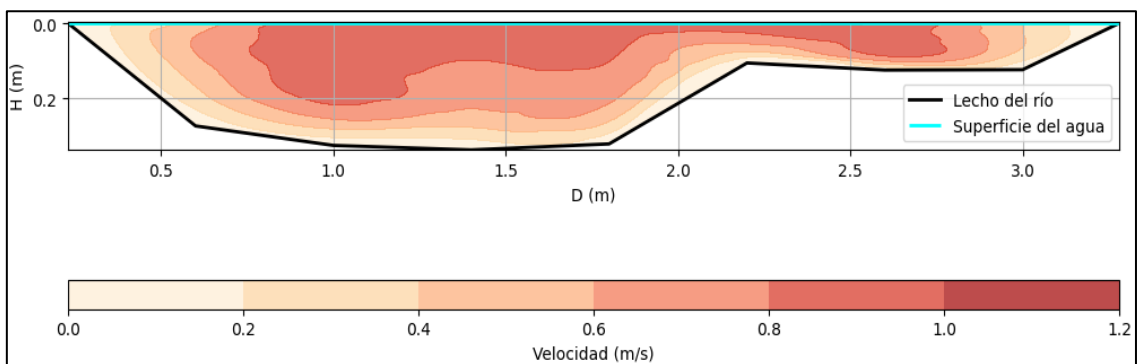
Análisis de las isotacas en caudales bajos



Se hizo análisis centrado en las isotacas, con el propósito de evaluar la distribución de la velocidad del flujo a lo largo de la sección transversal del río. Los gráficos obtenidos (ver figura 3.5) indican que, en condiciones de caudales bajos, la distribución de las velocidades es homogénea debido que en estas condiciones el flujo es laminar.

Figura 3.6

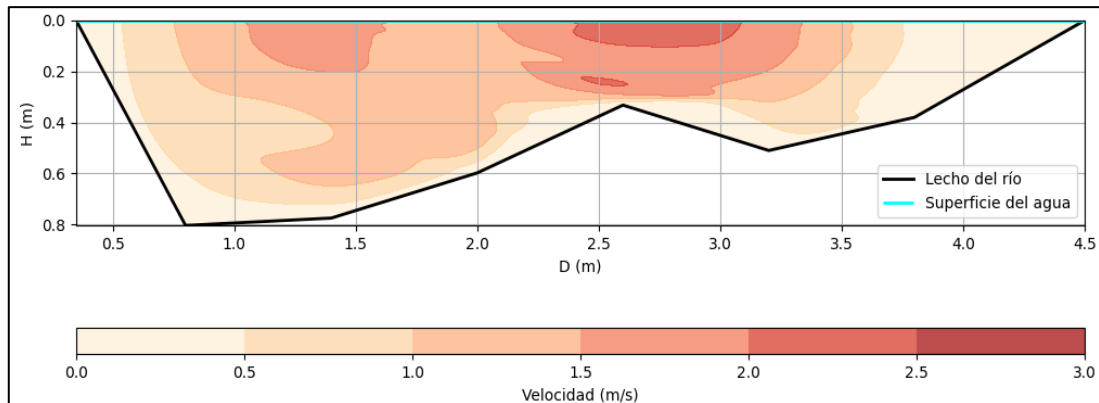
Análisis de las isotacas en caudales medios



Asimismo, se llevó a cabo el análisis de las isotacas en condiciones de caudales medios, los gráficos obtenidos (ver figura 3.6) revelan que, en estas condiciones del régimen hidrológico la distribución de las velocidades presenta una ligera distorsión, atribuible a la presencia de turbulencia en el punto de control.

Figura 3.7

Análisis de las isotacas en caudales altos

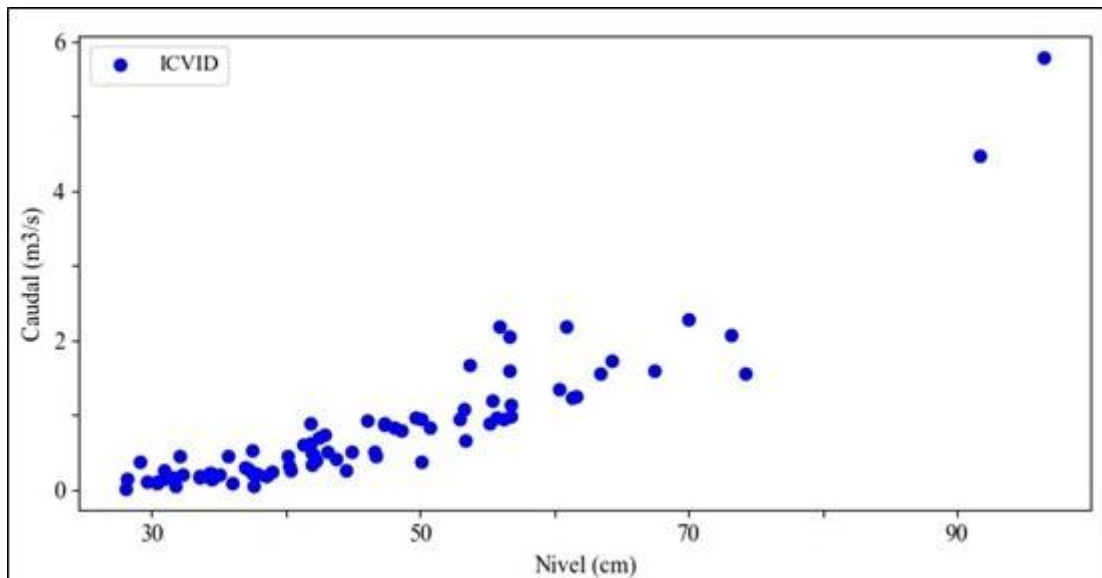


Finalmente se llevó a cabo el análisis de las isotacas en condiciones de eventos o crecidas, los gráficos (ver figura 3.7) obtenidos revelan que en estas condiciones del régimen hidrológico la distribución de las velocidades presenta distorsión, consecuencia de la fuerte turbulencia en el punto de control.

3.2.2. Aforos con videocámara

Figura 3.8

Diagrama de dispersión de aforos con video-cámara



Fuente: Elaboración propia con los datos del Instituto geofísico del Perú (IGP, 2024)

La Figura 3.8 muestra los resultados del monitoreo diario del caudal y nivel de agua en la estación Luricocha. Se registraron un total de 82 aforos con video-cámara

realizados entre el 26 de enero y el 30 de abril de 2024. En el gráfico se observa que, para niveles inferiores a 55 cm, los datos presentan menor dispersión y mayor precisión; no obstante, a partir de dicho nivel, la dispersión se incrementa, lo que conlleva un aumento en la incertidumbre de las mediciones.

3.2.2.1. Análisis de los vectores de velocidades superficiales en distintos regímenes hidrológicos.

Figura 3.9

Vectores de velocidad superficial en caudales bajos



Los vectores de velocidad obtenidos en condiciones de caudales bajos no fueron tan representativos debido a la alta transparencia del agua en estas circunstancias, lo que dificulta la captura de imágenes claras de las partículas en movimiento. Esta transparencia reduce el contraste necesario para que los algoritmos de velocimetría de imágenes identifique y rastree correctamente las partículas, afectando la precisión de los datos obtenidos. Como resultado, los análisis en caudales bajos presentan mayores limitaciones técnicas, subrayando la necesidad de optimizar las condiciones de monitoreo o considerar métodos complementarios para garantizar la calidad de los resultados.

Figura 3.10

Vectores de velocidad superficial en caudales medios



En condiciones de caudales medios, los vectores de velocidad presentan un comportamiento más confiable y representativo. Esto se debe a que el flujo del río genera un movimiento más definido de las partículas, facilitando su detección y seguimiento en las imágenes capturadas. Además, en esta situación, la transparencia del agua no representa un obstáculo significativo, ya que la presencia de turbulencias moderadas incrementa el contraste necesario para una adecuada identificación de las partículas. Por lo tanto, los resultados obtenidos en caudales medios ofrecen mayor precisión y estabilidad, lo que los convierte en una condición óptima para los análisis de velocimetría de imágenes de partículas.

Figura 3.11

Vectores de velocidad superficial en caudales altos



En condiciones de caudales altos, los vectores de velocidad obtenidos para la estación de Luricocha se comportan de manera dinámica y proporcionan resultados significativos, aunque con ciertos desafíos. El incremento en la velocidad del flujo genera un mayor movimiento de partículas, lo que favorece su detección y seguimiento en las imágenes capturadas. Sin embargo, el aumento de turbulencias y la presencia de resaltos hidráulicos presenta ruido en los datos, dificultando la identificación precisa de las trayectorias de las partículas. A pesar de estas limitaciones, los caudales altos permiten analizar flujos de mayor energía, ofreciendo información valiosa sobre las condiciones extremas del régimen hidrológico y el comportamiento del flujo en situaciones de crecida.

Figura 3.12

Intervalo de predicción al 95% de método Videocámara

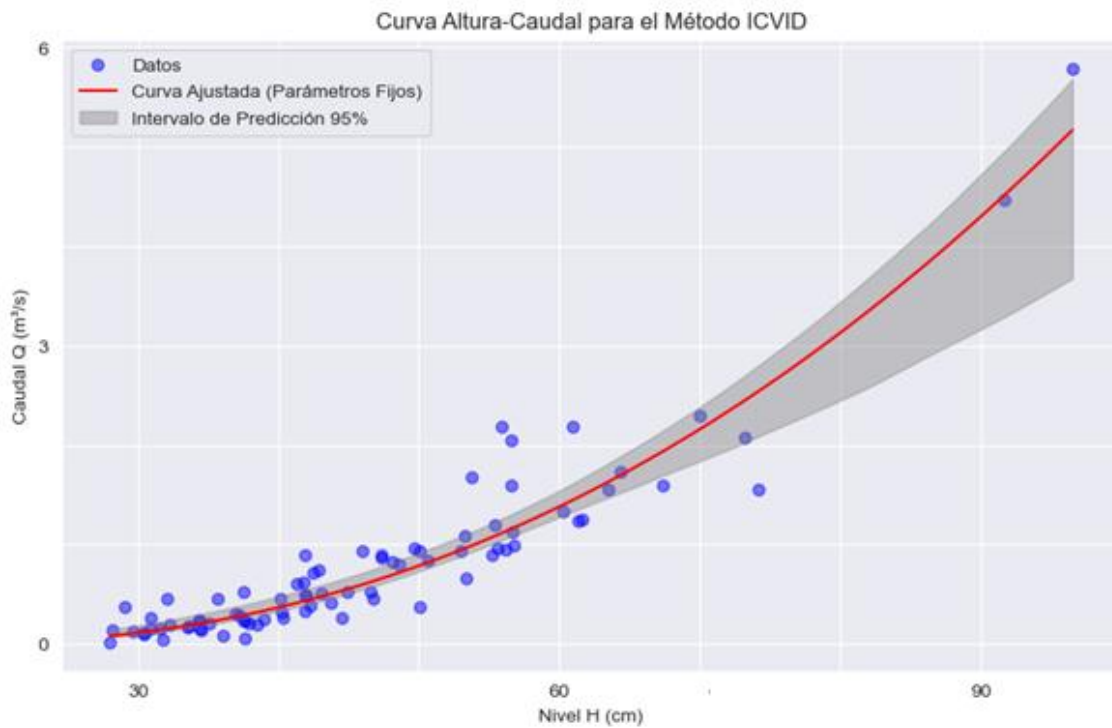


Tabla 3.2

Parámetros y Estadísticos para ICVID

Parámetros	Valor
Exponente p	2.18
Error estándar de los residuos	0.28
Grados de libertad	79
Valor t (95% IC)	1.99

Nota: Parámetros y estadísticos del método de la videocámara

La tabla 3.2 muestra el error estándar de los residuos es 0.28, indicando una dispersión moderada de los datos respecto al modelo, con grados de libertad 79, calculados como el número de observaciones menos el número de parámetros y un valor t de 1.99, utilizado para construir intervalos de confianza al 95%.

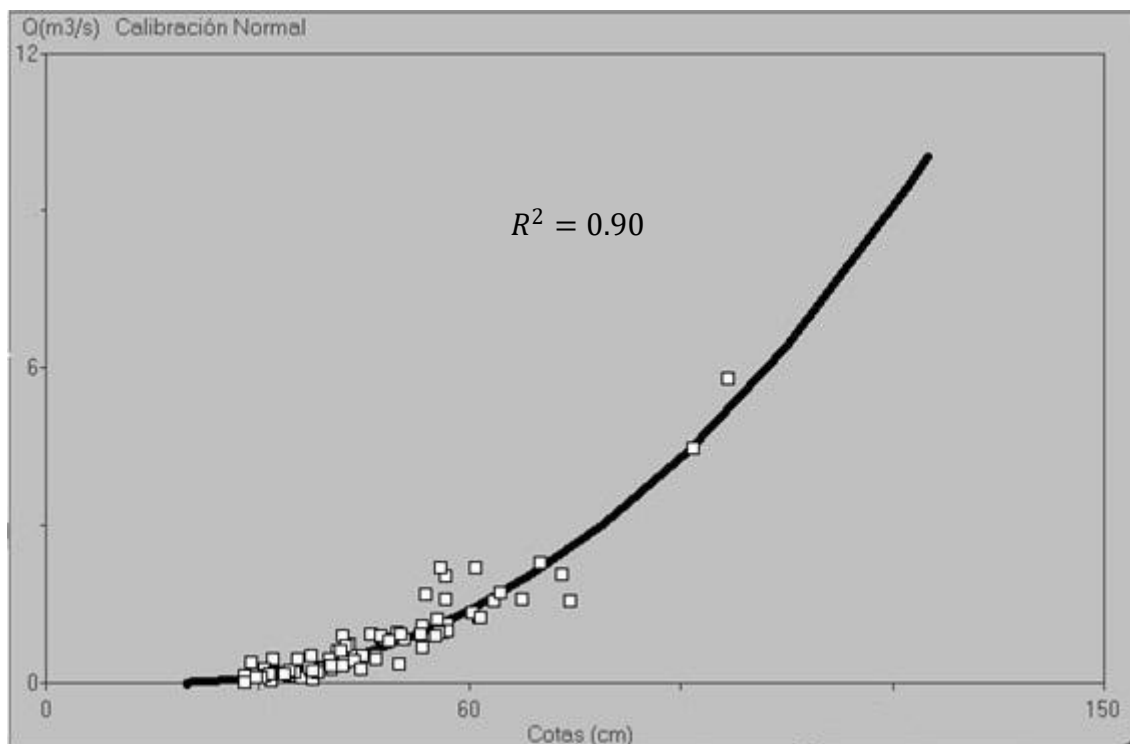
El área sombreada en gris indica el intervalo de predicción al 95% para el método de videocámara, mostrando la confianza de las predicciones alrededor de la curva

ajustada. La forma de la curva y la dispersión de los datos permiten evaluar la correspondencia entre el nivel y el caudal para los parámetros específicos considerados.

Intervalo de predicción (sombreado gris) indica el rango de incertidumbre asociado al modelo ajustado, con un nivel de confianza del 95%. Este intervalo es más estrecho en niveles intermedios (30-55 cm), donde los datos están más concentrados y cercanos a la línea de ajuste, mientras se amplía para los niveles altos, reflejando incertidumbres mayores a $2\text{m}^3/\text{s}$ en la predicción del modelo debido a la menor densidad de datos en esas regiones.

Figura 3.13

Curva gasto líquido de método de videocámara



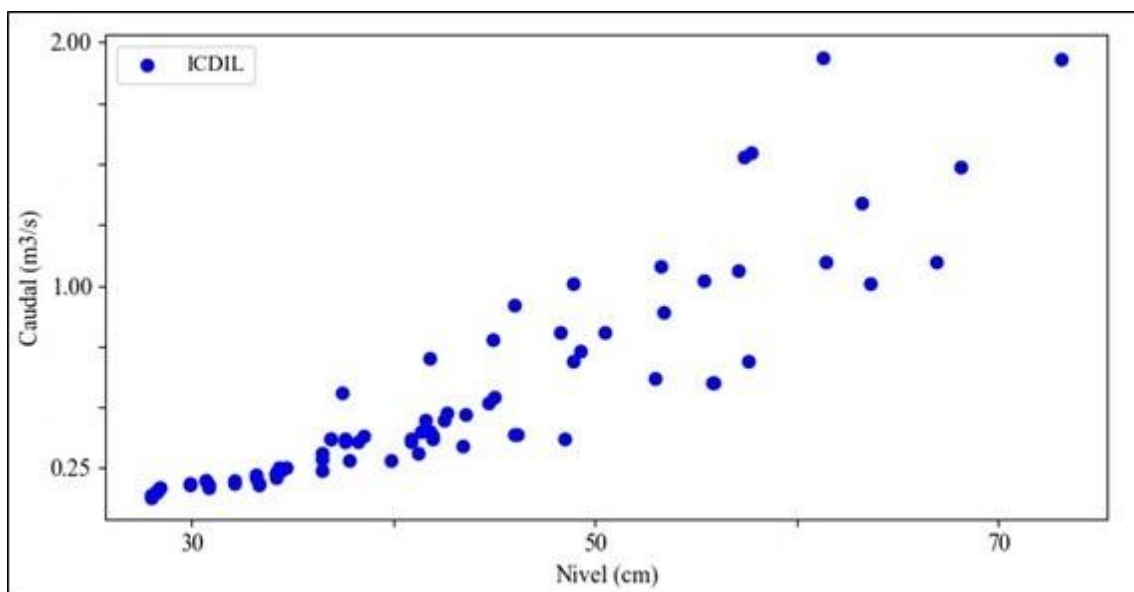
La figura 3.13 presentada muestra la relación entre las cotas de agua (cm) y el caudal en (m^3/s) en el río Luricocha, obtenida mediante aforos realizados con el método de videocámara, esta grafica fue generada con el software Hydraccess. En niveles bajos de agua (cotas inferiores a 45 cm), los caudales son pequeños, mientras que a medida que el nivel del agua aumenta, el caudal crece exponencialmente, alcanzando valores superiores a $10\text{ m}^3/\text{s}$ para cotas mayores a 120 cm .

La línea negra continua indica el ajuste matemático de los datos medidos, mientras que los puntos reflejan las mediciones individuales de campo. El coeficiente de determinación ($R^2=0.90$) demuestra un ajuste alto entre los datos observados y el modelo. Este valor indica que el 90% de la variabilidad del caudal puede explicarse por las variaciones en el nivel del agua, lo cual respalda la robustez y confiabilidad del ajuste.

3.2.3. Aforos con trazador químico

Figura 3.14

Diagrama de dispersión de aforos con trazador químico



Fuente: Elaboración propia con los datos del Instituto geofísico del Perú (IGP, 2024)

La Figura 3.14 muestra los resultados del monitoreo diario del caudal y nivel de agua en la estación Luricocha. Se registraron un total de 80 aforos con trazador químico realizados entre el 7 de febrero y el 30 de abril de 2024. En el gráfico se observa que, para niveles inferiores a 40 cm, los datos presentan menor dispersión y mayor precisión; no obstante, a partir de dicho nivel, la dispersión se incrementa, lo que conlleva un aumento en la incertidumbre de las mediciones.

Figura 3.15

Intervalo de predicción al 95% de método trazador químico

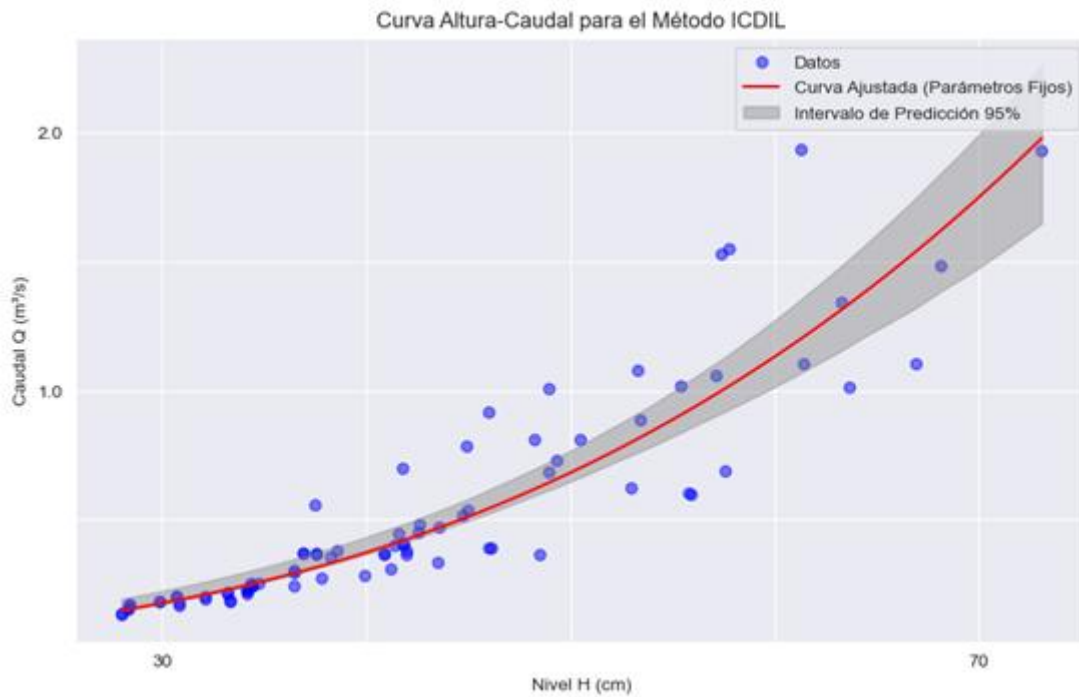


Tabla 3.3

Parámetros y Estadísticos para ICDIL

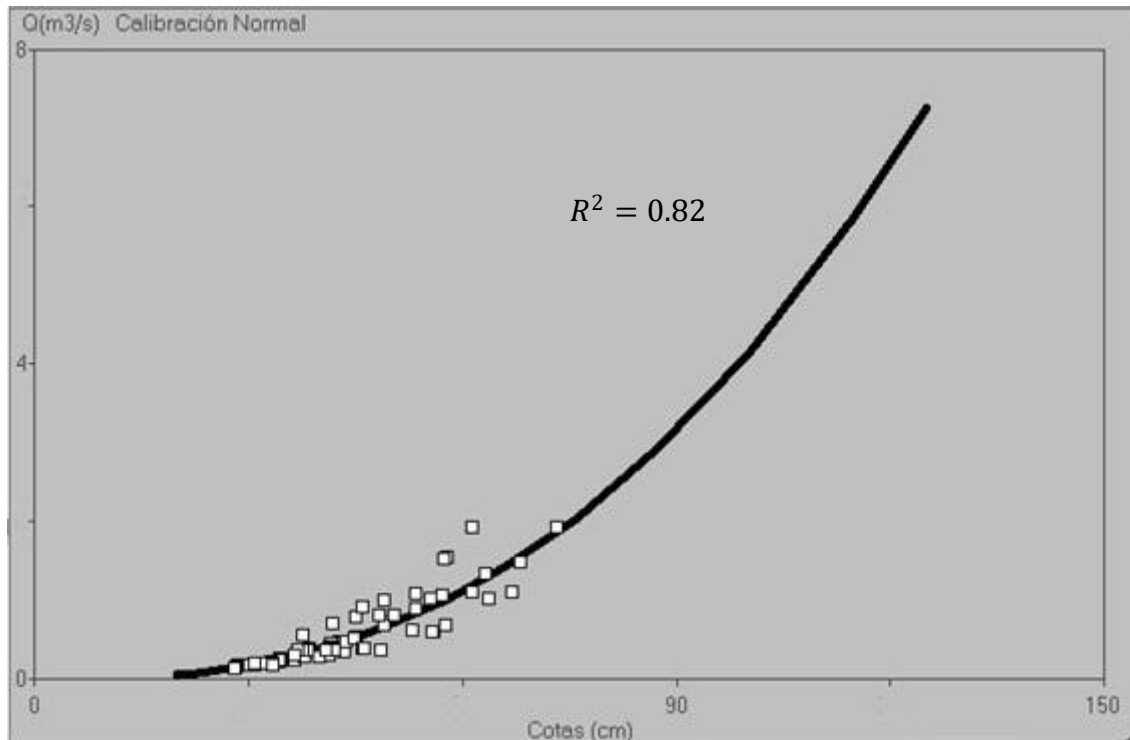
Parámetros	Valor
Exponente p	2.4337
Error estándar de los residuos	0.18
Grados de libertad	79
Valor t (95% IC)	1.99

La figura 3.15 presenta un error estándar de los residuos es 0.18 (ver tabla 3.3), el más bajo entre los métodos, sugiriendo un mejor ajuste. Grados de libertad y valor t similares a los otros métodos, permitiendo comparaciones directas.

También en esta figura se aprecia el rango de incertidumbre asociado al modelo ajustado, con un nivel de confianza del 95%. Este intervalo es más estrecho en niveles inferiores a 50cm, donde los datos están más concentrados y cercanos a la línea de ajuste, mientras se amplía para los niveles altos, reflejando incertidumbres cercanas a $1\text{m}^3/\text{s}$ para niveles mayores a 70 cm.

Figura 3.16

Curva gasto líquido de método de trazador químico



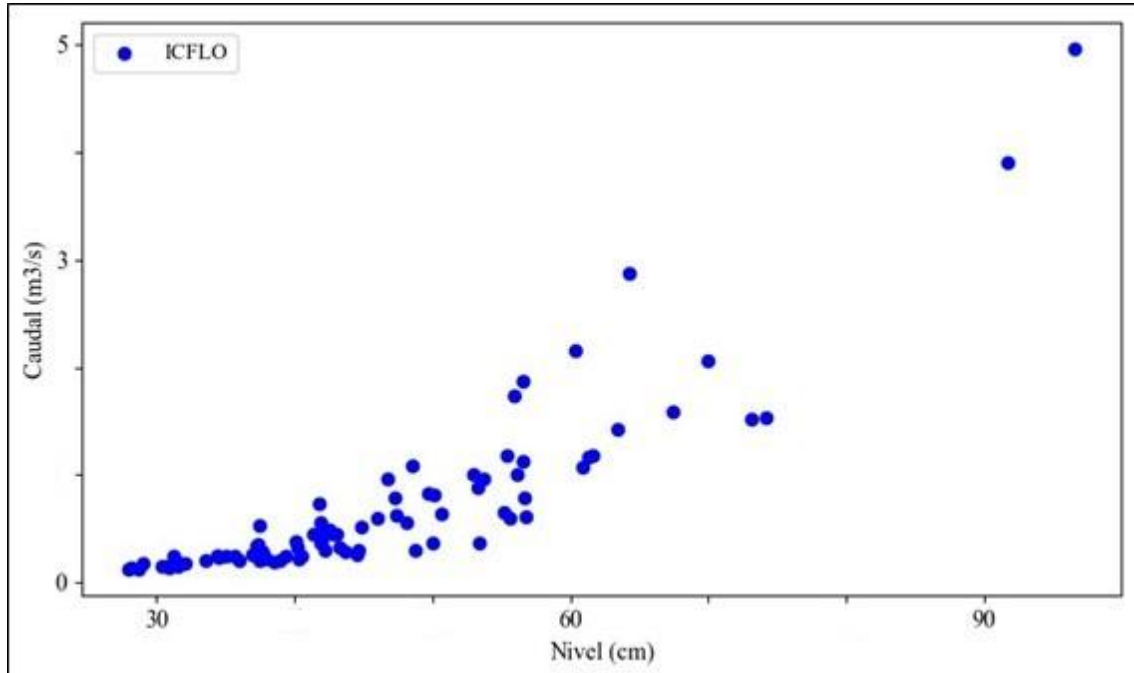
En la figura 3.16 presento la curva de gasto líquido obtenida mediante un ajuste exponencial aplicado a los datos de aforos realizados con trazador químico. La curva de la figura es el resultado de la extrapolación para los niveles de agua registrado en la estación de Luricocha, este describe un patrón creciente, que evidencia un incremento sustancial en el caudal a medida que los niveles de agua superan los 50 cm. Este comportamiento refleja las condiciones hidrodinámicas del río, donde un aumento en la altura del nivel de agua se traduce en una mayor capacidad de transporte de caudal. Asimismo, la distribución de los datos muestra una menor dispersión en niveles menores a 50 cm, lo que indica mayor exactitud en la estimación del caudal en esos rangos, mientras que en niveles mayores a 50 cm se aprecia una ligera variación que están asociadas a las condiciones locales de la sección hidráulica y también por las limitaciones de captura de datos del equipo de medición en crecidas.

La ecuación hidráulica asociada a la curva (ver figura 3.16) tiene un coeficiente de determinación de $R^2=0.82$ que demuestra un ajuste alto entre los datos observados y el modelo. Este valor indica que el 82% de la variabilidad del caudal puede explicarse por las variaciones en el nivel del agua, lo cual respalda la robustez y confiabilidad del ajuste.

3.2.4. Aforos con flotador

Figura 3.17

Diagrama de dispersión de aforos con flotador

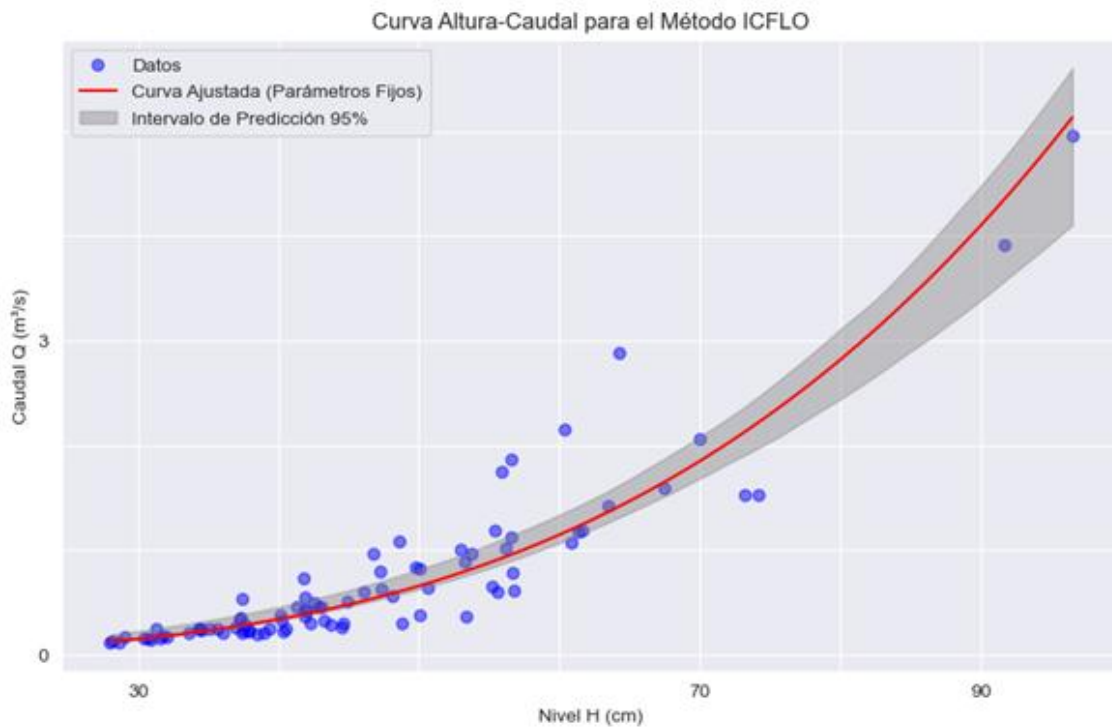


Fuente: Elaboración propia con los datos del Instituto geofísico del Perú (IGP, 2024)

La Figura 3.17 muestra los resultados del monitoreo diario del caudal y nivel de agua en la estación Luricocha. Se registraron un total de 86 aforos con flotador realizados entre el 26 de enero y el 30 de abril de 2024. En el gráfico se observa que, para niveles inferiores a 45 cm, los datos presentan menor dispersión y mayor precisión; no obstante, a partir de dicho nivel, la dispersión se incrementa, lo que conlleva un aumento en la incertidumbre de las mediciones.

Figura 3.18

Intervalo de predicción al 95% del método flotador



La figura 3.18 se observa el área sombreada en gris indica el intervalo de predicción al 95% para el método del flotador, mostrando la confianza de las predicciones alrededor de la curva ajustada.

Tabla 3.4

Parámetros y Estadísticos para ICFLO

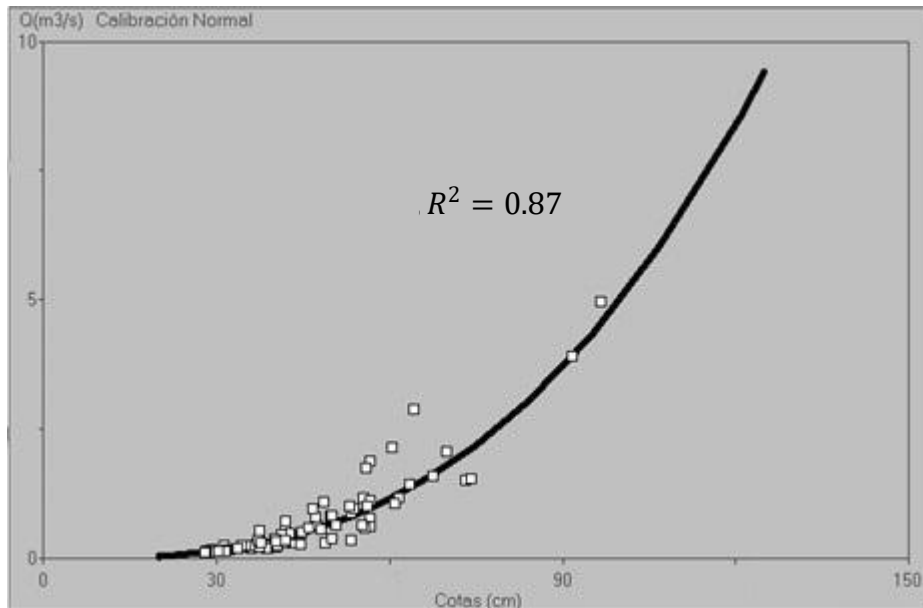
Parámetros	Valor
Exponente p	2.73
Error estándar de los residuos	0.29
Grados de libertad	83
Valor t: (95% IC)	1.99

Nota: Parámetros estadísticos para el método de flotador

El modelo de la figura 3.18 presenta un error estándar de los residuos es 0.29, el más alto, mayor dispersión y menor ajuste, con grados de libertad 83, el mayor número de observaciones entre los números.

Figura 3.19

Intervalo de predicción al 95% del método flotador

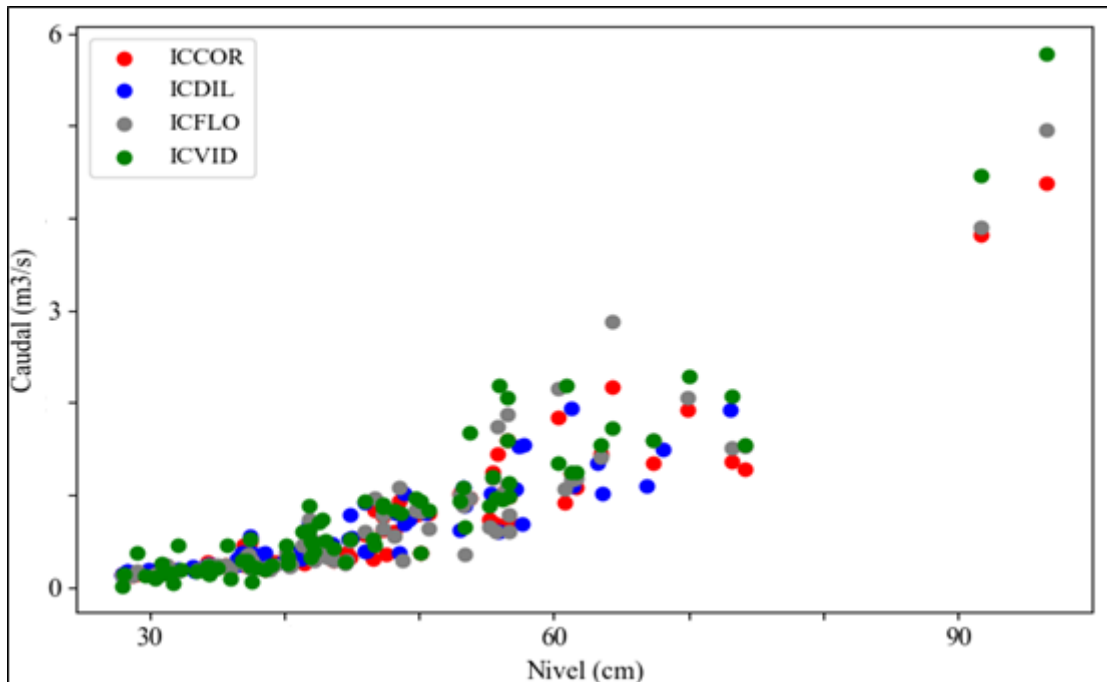


En la figura 3.19 presento la curva de gasto líquido obtenida mediante un ajuste exponencial basado en datos de aforos realizados con el método flotador. La curva, extrapolada para los niveles de agua registrados en la estación de Luricocha, sigue un patrón creciente que refleja un incremento significativo en el caudal a medida que el nivel de agua supera los 60 cm. Este comportamiento es representativo de las condiciones hidrodinámicas del río, donde un mayor nivel de agua incrementa la capacidad de transporte de caudal. En niveles inferiores a 60 cm, se observa una menor dispersión de los datos, indicando mayor precisión en la estimación, mientras que en niveles más altos la variabilidad se asocia a factores locales de la sección hidráulica y a las limitaciones del método empleado.

La ecuación hidráulica asociada a la curva presenta un coeficiente de determinación de $R^2=0.87$, lo que demuestra un alto grado de ajuste entre los datos observados y el modelo. Este valor indica que el 87% de la variabilidad en el caudal puede explicarse por las variaciones en el nivel de agua, lo que respalda la confiabilidad y la robustez del ajuste realizado.

Figura 3.20

Diagrama de dispersión de las distintas metodologías de aforo



Fuente: Elaboración propia con los datos del Instituto geofísico del Perú (IGP, 2024)

En la figura 3.20 se presenta la dispersión de datos de nivel de agua y caudal obtenidos mediante cuatro metodologías: correntómetro (ICCOR), dilución con trazadores (ICDIL), flotador (ICFLO) y videocámara (ICVID). Estos resultados corresponden a las mediciones realizadas durante la campaña de aforo en el río Luricocha, reflejando las estimaciones de caudal para una amplia gama de niveles de agua, desde valores bajos hasta máximos registrados.

Se observa que, en general, todas las metodologías muestran un comportamiento creciente del caudal con el aumento del nivel de agua, lo que es consistente con la dinámica hidráulica esperada. Sin embargo, existen diferencias en las estimaciones entre los métodos, siendo más evidentes en niveles altos, donde algunas metodologías, como el flotador y la videocámara, tienden a presentar mayor dispersión. Estas variaciones reflejan las particularidades y limitaciones técnicas de cada método, subrayando la importancia de su selección según las condiciones específicas del río y los objetivos del estudio.

Tabla 3.5*Valores máximos y mínimos obtenidos por captores en la estación Luricocha*

Captor	Nº Aforos	Fecha	Qmín (m ³ /s)	Fecha	Qmáx (m ³ /s)
ICCOR	80	28/04/2024 15:30	0.12	28/02/2024 11:16	4.38
ICVID	82	30/04/2024 11:20	0.02	28/02/2024 11:16	5.79
ICDIL	80	30/04/2024 11:16	0.13	01/03/2024 13:10	1.94
ICFLO	86	28/04/2024 15:30	0.12	28/02/2024 11:16	4.96

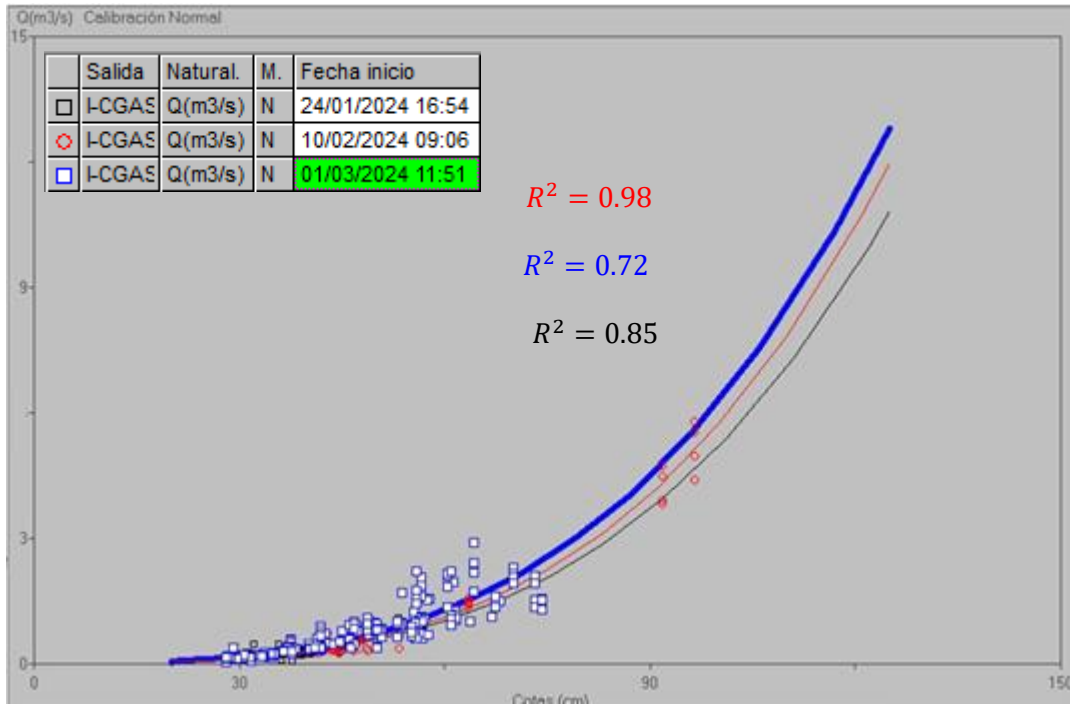
En este estudio, los mayores valores de caudal fueron registrados durante los periodos de febrero y marzo del 2024, con niveles de agua que variaron entre 61 y 97 cm, y caudales máximos que oscilan entre 2 y 6 m³/s. En contraste, durante abril se llevaron a cabo mediciones de caudales mínimos, observándose niveles entre 28 y 29 cm con caudales bajos y constantes de 0.10 m³/s en la mayoría de los puntos evaluados. La tabla 3.5 detalla los aforos obtenidos por cada captor, presentando los resultados individuales correspondientes.

3.3. Generación de familia de curvas

Tras la actualización de los aforos correspondientes al periodo 24/01/24 al 31/04/24 en la base de datos Hydraccess del IGP, se generaron las curvas de gasto. Considerando la dinámica geomorfológica de la sección de aforo y el análisis batimétrico temporal previamente descrito, se evaluó la presencia de distintas familias de curvas de tendencia durante este lapso. En la Figura 3.21 se presentan las tres familias de curvas generadas en el periodo de estudio, mostrando que las tres siguen una tendencia de tipo potencial. La curva azul corresponde a los aforos realizados del 01/03/24 al 31/04/24, la curva roja representa los aforos del 10/02/24 al 31/02/24, y la curva negra abarca el periodo del 24/01/24 al 09/02/24.

Figura 3.21

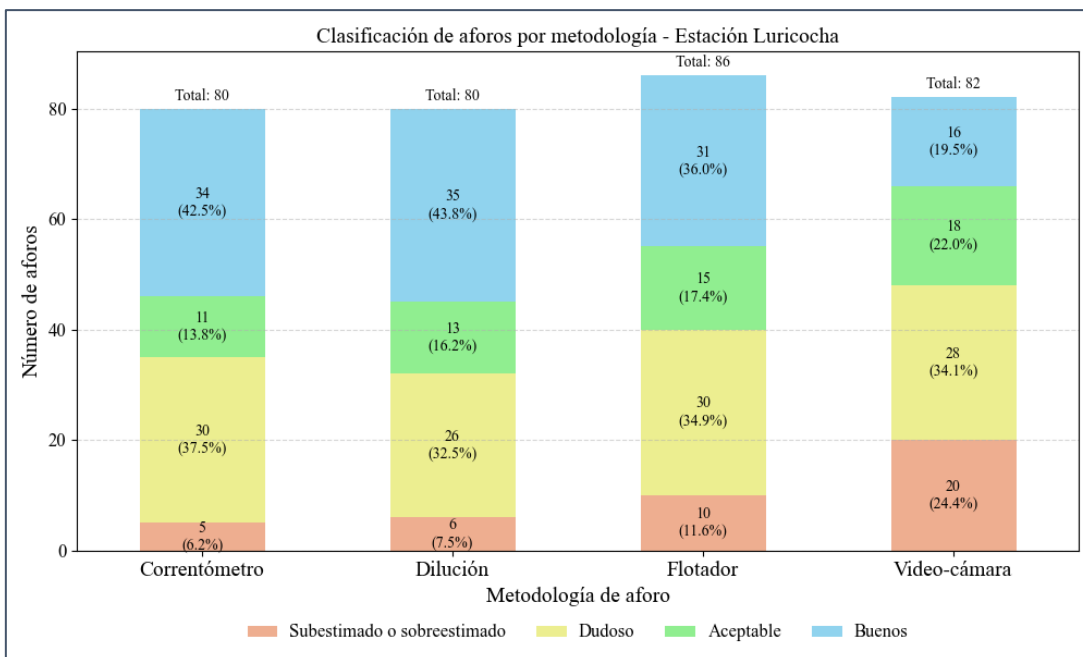
Familias de curva altura gasto generadas en Hydraccess.



3.4. Estimación de incertidumbre entre las metodologías empleadas

Figura 3.22

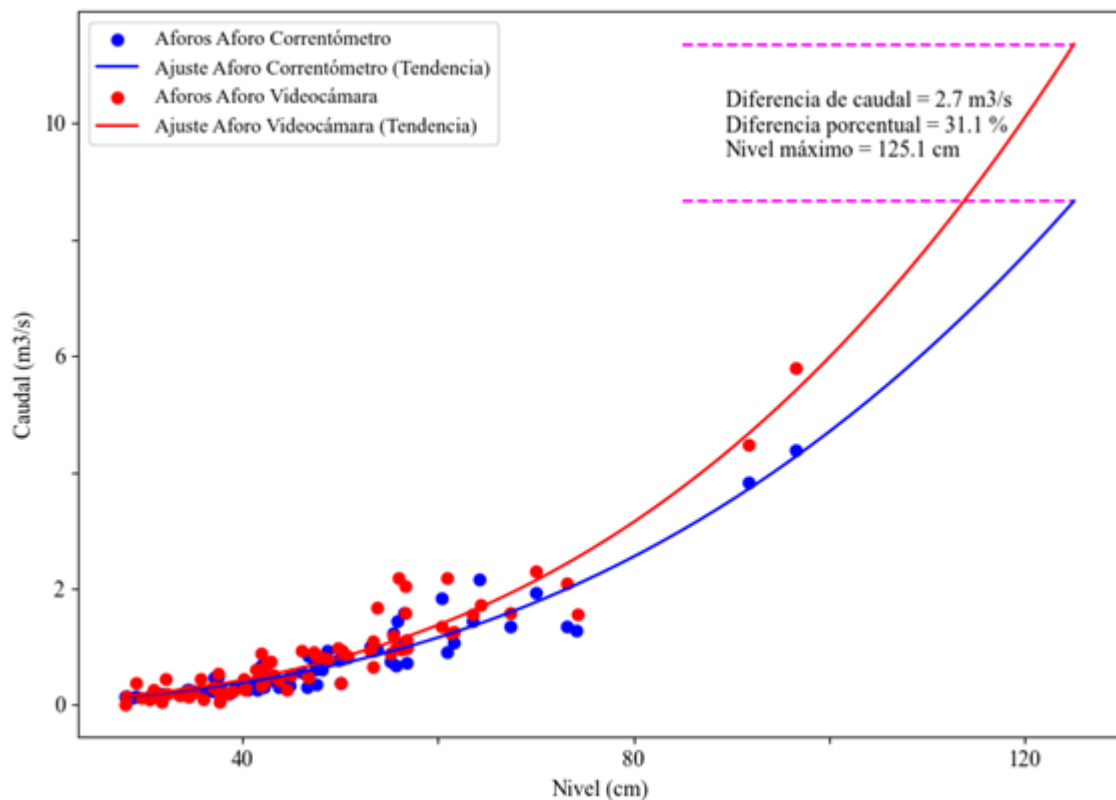
Comparación de las metodologías según la clasificación de Tomkins, 2014.



Según la clasificación de Tomkins (2014) las metodologías de aforo aplicadas en la estación hidrométrica de Luricocha evidencia que la técnica de dilución presentó el mayor porcentaje de aforos clasificados como “Buenos” (43.8%), seguida por el correntómetro (42.5%) y el flotador (36.0%), lo que demuestra su alta precisión bajo condiciones favorables. En contraste, la video-cámara mostró el menor porcentaje de resultados buenos (19.5%) y las mayores proporciones de aforos “Subestimados o sobreestimados” (24.4%), lo que sugiere una mayor sensibilidad a factores externos como el ángulo de grabación de video, iluminación, turbulencia superficial o calidad de imagen. Los valores clasificados como “Aceptables” oscilaron entre 13.8% y 22.0% en todas las metodologías, reflejando un nivel intermedio de confiabilidad. En conjunto, los resultados indican que las técnicas de dilución y correntómetro son las más consistentes, mientras que la video-cámara requiere condiciones óptimas de operación para garantizar resultados fiables.

Figura 3.23

Comparación entre el método correntómetro y videocámara

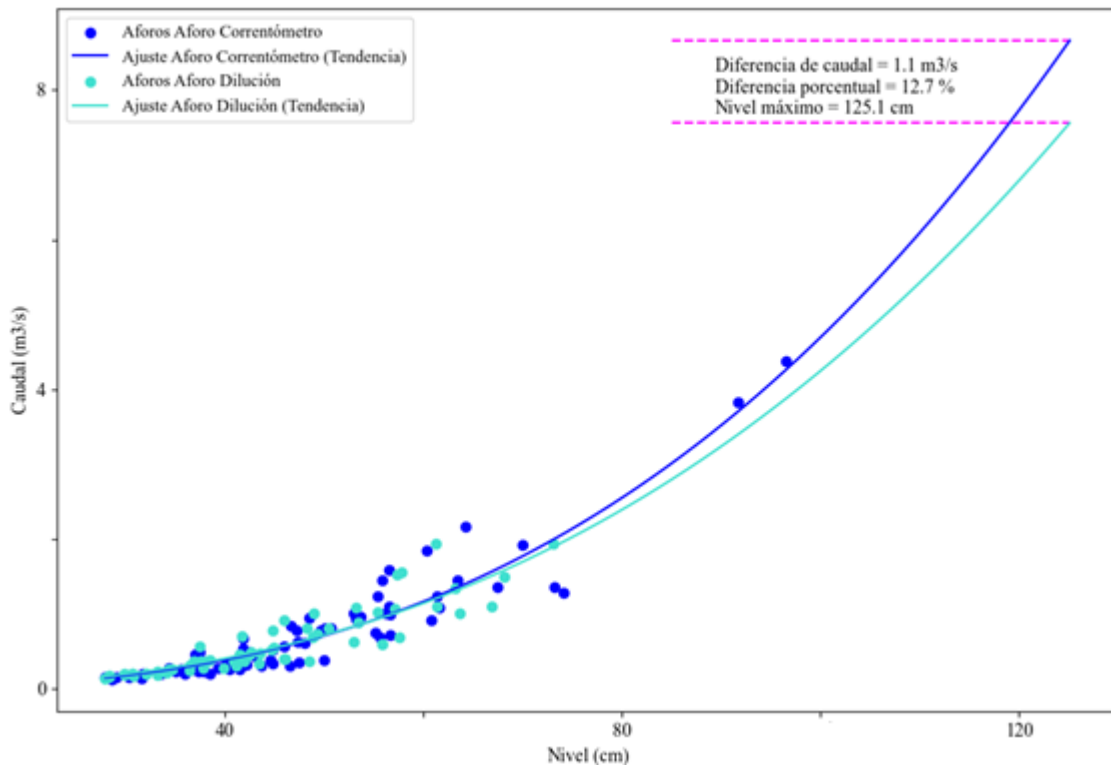


La figura 3.23 muestra las curvas de ajuste para los aforos obtenidos mediante dos métodos distintos: el uso de correntómetro (curva azul) y videocámara (curva roja). Cada conjunto de datos presenta un patrón creciente que refleja la relación entre el nivel de agua y el caudal. Las curvas de tendencia indican que ambos métodos presentan una correlación positiva, con un ajuste exponencial en la estimación del caudal.

Sin embargo, se observa una diferencia significativa entre los ajustes de las dos técnicas, particularmente a niveles de agua más altos. En el nivel máximo de 125.1 cm, la diferencia absoluta en caudal es de 2.7 m³/s, lo que equivale a una diferencia porcentual del 31.1 %. Esta discrepancia puede deberse a las limitaciones o características específicas de cada método de aforo, como la sensibilidad de los equipos o las condiciones de flujo en el río. La curva obtenida con la videocámara tiende a sobrestimar el caudal en comparación con la curva del correntómetro, lo que resalta la importancia de considerar estas diferencias al seleccionar un método para la estimación de caudales.

Figura 3.24

Comparación entre el método del correntómetro y trazador químico.

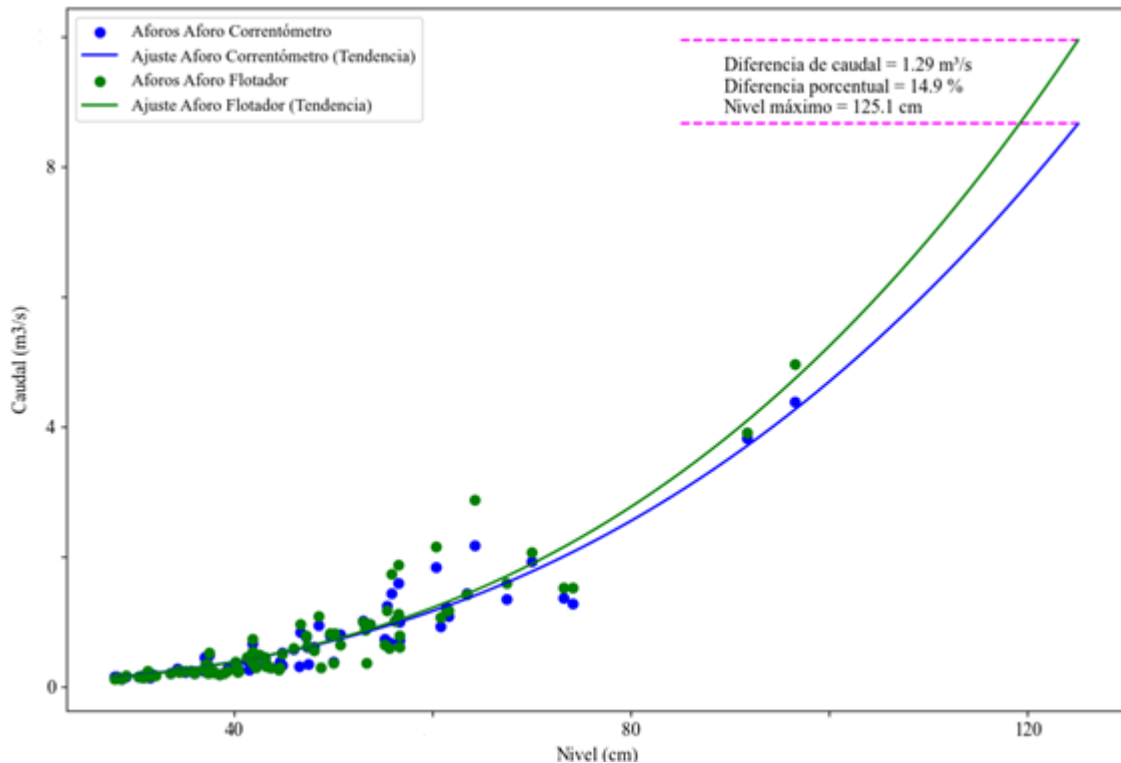


La figura 3.24 muestra las curvas de ajuste obtenidas mediante dos métodos de aforo: el uso de un correntómetro (curva azul) y el método de dilución con trazadores (curva celeste). Ambos conjuntos de datos presentan una relación creciente entre el nivel de agua y el caudal, modelada mediante ajustes de tendencia exponencial.

A diferencia de la comparación anterior, las diferencias entre ambos métodos son menores. En el nivel máximo de 125.1 cm, la diferencia absoluta en caudal es de 1.1 m³/s, lo que equivale a una diferencia porcentual del 12.7 %. Esto indica una mayor concordancia entre los métodos en comparación con otras técnicas, aunque persisten ciertas discrepancias en niveles de agua más altos. Estas diferencias son atribuidas a factores como la precisión del método de dilución en flujos elevados o la sensibilidad del correntómetro en las condiciones hidráulicas del río. En general, ambos métodos proporcionan estimaciones consistentes, siendo crucial considerar el contexto operativo y los requerimientos de precisión al elegir el método adecuado.

Figura 3.25

Comparación entre el método del correntómetro y flotador.



La figura 3.25 muestra una comparación entre los ajustes de caudal obtenidos mediante dos métodos: el correntómetro (representado por la curva azul) y el método de

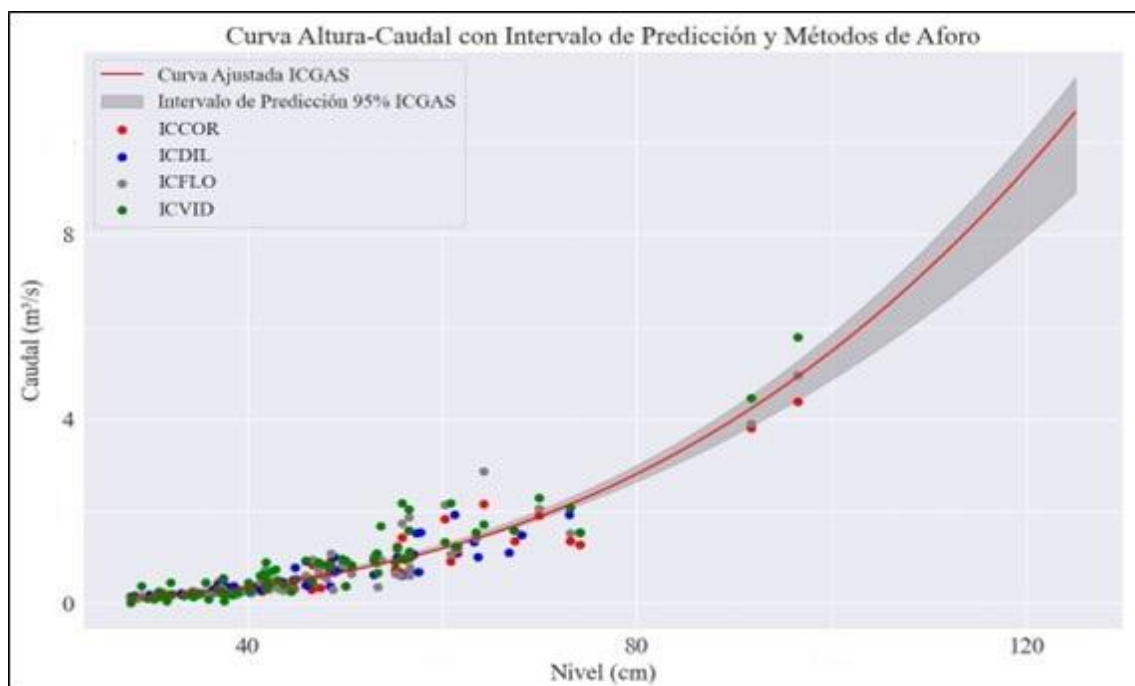
flotador (representado por la curva verde). Los datos y ajustes evidencian una relación creciente entre el nivel de agua (en centímetros) y el caudal (en metros cúbicos por segundo), ambos modelados con curvas de tendencia exponencial.

En el nivel máximo de 125.1 cm, la diferencia en caudal estimado entre ambos métodos es de 1.29 m³/s, lo que representa una diferencia porcentual del 14.9 %. Esta discrepancia puede atribuirse a la naturaleza de cada técnica: el método de flotador tiende a sobrestimar los caudales debido a su dependencia de la velocidad superficial, la cual puede ser afectada por turbulencias o irregularidades en la superficie del flujo. Por otro lado, el método del correntómetro proporciona estimaciones más representativas de la velocidad promedio de la sección transversal, aunque también son influenciado por las condiciones locales del flujo.

A niveles más bajos, ambos métodos presentan una mejor concordancia, lo que sugiere que las diferencias se amplifican a medida que el flujo y el nivel del agua aumentan. Estas variaciones destacan la importancia de considerar las limitaciones intrínsecas de cada método y la necesidad de evaluar cuidadosamente cuál es más adecuado según las características hidráulicas del río y los objetivos del estudio.

Figura 3.26

Incertidumbre en la estimación del caudal.



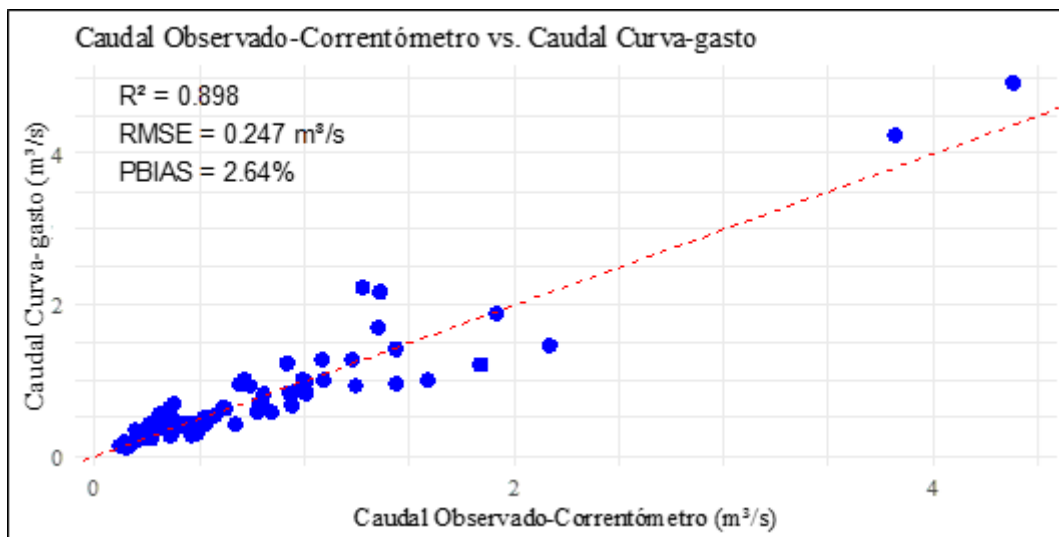
La gráfica 3.26 muestra una curva extrapolada con los datos de las 4 metodologías empleados, junto con el intervalo de predicción del 95%, lo que indica el rango dentro del cual se espera que caigan los valores de caudal con un 95% de confianza. Al observar el intervalo de predicción para un nivel de agua 125 cm (nivel máximo registrado), se tiene un rango de incertidumbre superior a 2 m³/s que representa el 25%. La amplitud de este intervalo refleja la variabilidad en los caudales estimados y la incertidumbre asociada la dispersión de los puntos de medición.

Este análisis de la incertidumbre es fundamental para comprender cómo la variabilidad en las mediciones influye en la estimación del caudal, especialmente en niveles elevados de agua como 125 cm, y cómo estos errores impactan en la precisión de la curva altura gasto y las estimaciones de caudal en el caso de estudio del río Luricocha.

3.5. Validación de los resultados

Figura 3.27

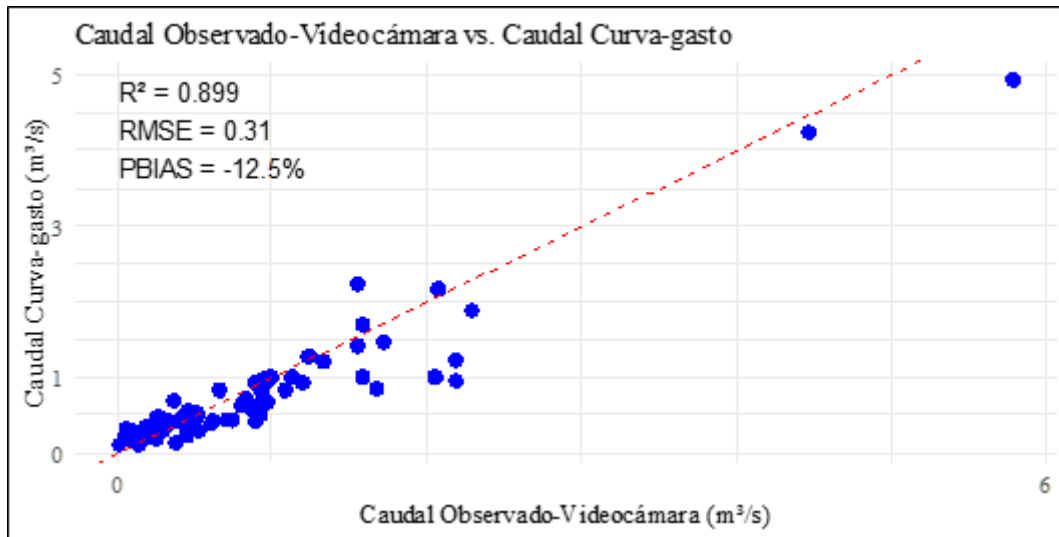
Correlación de caudal observado con correntómetro vs el caudal del modelo



El modelo de la figura 3.27 presentó un buen desempeño en la estimación de caudales, con un coeficiente de determinación $R^2=0.9$, un error cuadrático medio (RMSE) de 0.3 m³/s y un sesgo porcentual (PBIAS) de 2.6%. Estos resultados indican que el modelo explica adecuadamente la variabilidad de los datos observados, con errores moderados y una ligera tendencia a la subestimación, lo cual se observa en la dispersión de los puntos y la posición de la línea de regresión respecto a la línea 1:1.

Figura 3.28

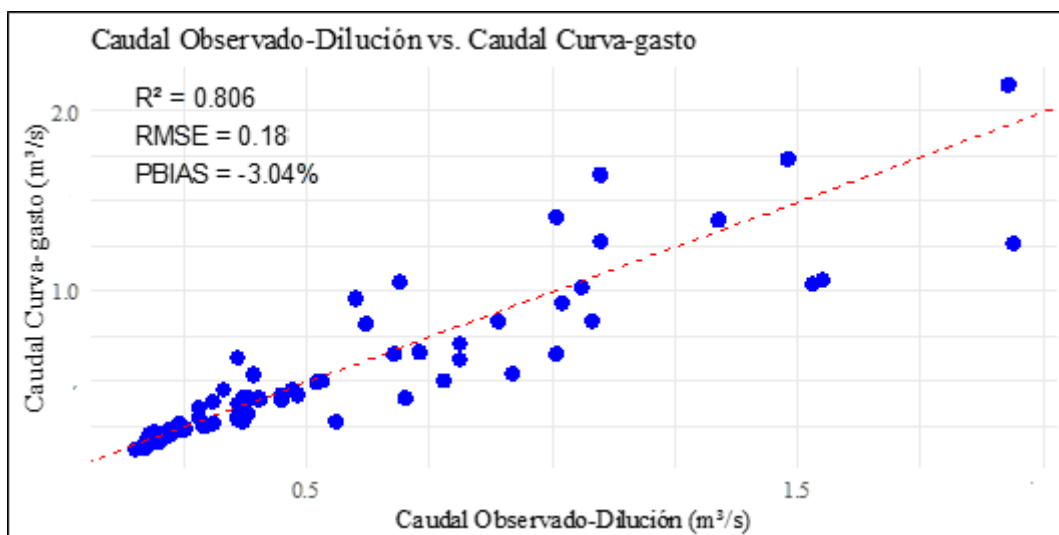
Correlación de caudal observado con videocámara vs el caudal del modelo.



El modelo de la figura 3.28 presenta un buen ajuste con un coeficiente de determinación $R^2=0.9$, aunque muestra un error moderado ($RMSE = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$) y una sobrestimación promedio de los caudales observados ($PBIAS = -12.5\%$). Esto indica que, si bien el modelo reproduce adecuadamente la tendencia general de los caudales, tiende a sobrestimar los valores reales, lo cual es coherente con la dispersión observada por encima de la línea 1:1 en el gráfico.

Figura 3.29

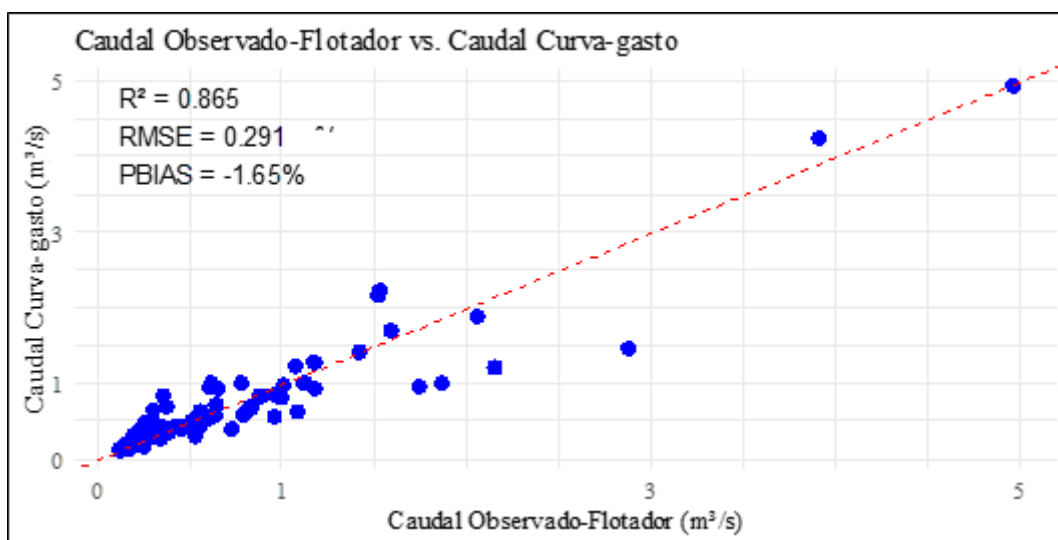
Correlación de caudal observado con dilución vs el caudal del modelo.



El modelo de la figura 3.29 obtuvo un coeficiente de determinación de $R^2=0.81$, lo que indica que explica el 80.0% de la variabilidad de los caudales observados. A pesar de este ajuste moderado, el error cuadrático medio fue relativamente bajo ($RMSE = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}$), lo cual refleja una buena precisión en las estimaciones individuales. El sesgo porcentual ($PBIAS = -3.0\%$) indica una ligera sobrestimación de los caudales observados, aunque con un valor lo suficientemente bajo como para considerarse aceptable en términos de balance. En conjunto, el modelo presenta un desempeño razonable, con errores bajos y una leve tendencia a la sobrestimación

Figura 3.30

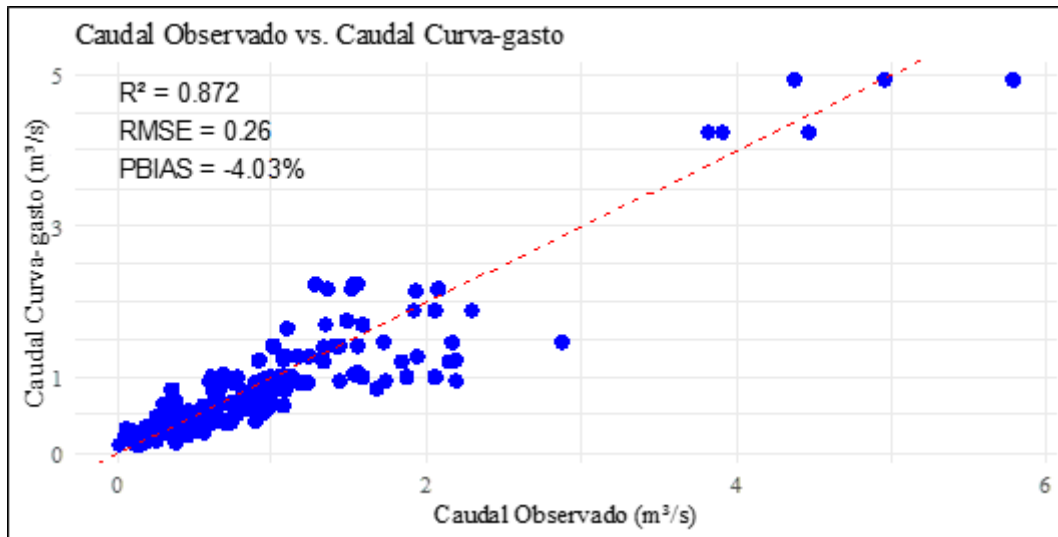
Correlación de caudal observado con Flotador vs el caudal del modelo.



El modelo de la figura 3.30 muestra un buen desempeño general, con un coeficiente de determinación $R^2=0.9$, lo que indica que explica el 86.5% de la variabilidad de los caudales observados. El error cuadrático medio ($RMSE$) fue de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$, evidenciando un error moderado en las estimaciones. Además, el sesgo porcentual ($PBIAS$) fue de -1.7% , indicando una leve sobrestimación, pero sin afectar significativamente la calidad de los resultados. Estas métricas reflejan un modelo confiable, con buena precisión y una tendencia bien equilibrada.

Figura 3.31

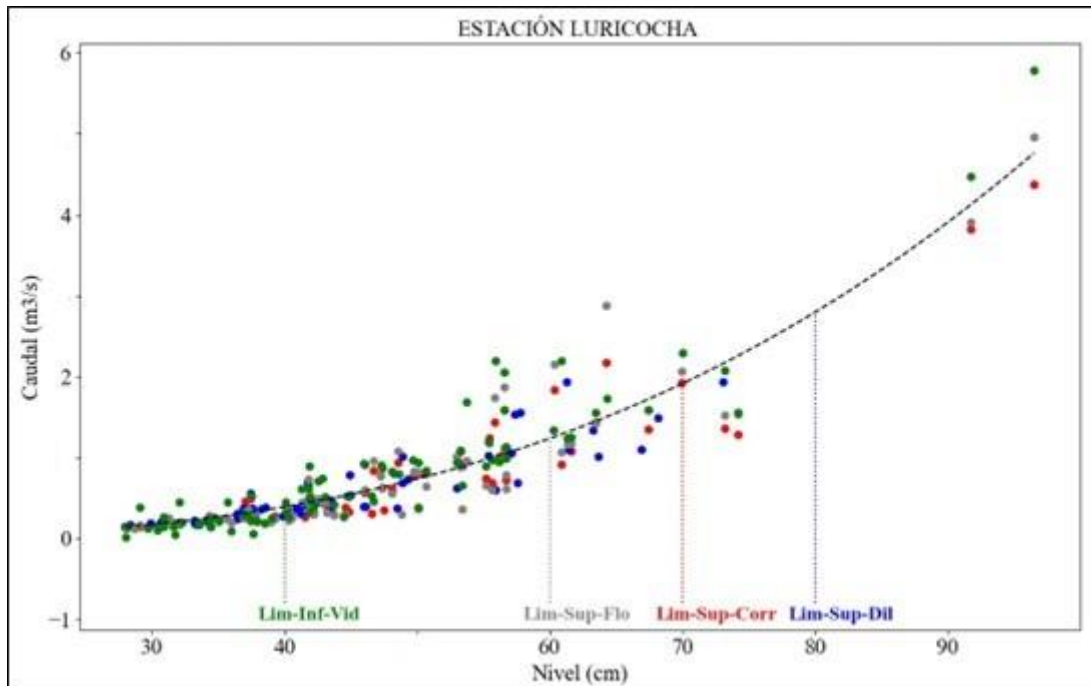
Correlación de caudal observado vs el caudal del modelo.



El modelo de la figura 3.31 presentó un buen desempeño general, con un coeficiente de determinación de $R^2=0.9$, lo que indica que reproduce adecuadamente la variabilidad de los caudales observados. El (RMSE) fue de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$, reflejando una precisión aceptable en las estimaciones. El sesgo porcentual (PBIAS) fue de -4.0% , señalando una leve tendencia del modelo a sobreestimar los caudales, aunque dentro de márgenes aceptables. En conjunto, estas métricas indican que el modelo es confiable para la simulación hidrológica en la zona de estudio.

Figura 3.32

Clasificación de las metodologías en la estación de Luricocha.



Tras realizar la campaña de campo (monitoreo diario) y el análisis de los resultados obtenidos, se han establecido los rangos específicos para el uso de cada metodología (ver figura 3.32), como se detalla a continuación:

El uso del correntómetro resulta adecuado en niveles de agua menores a 70 cm, ya que a partir de este umbral se genera una fuerte turbulencia en el flujo, lo cual afecta negativamente la precisión de las mediciones. En el caso de la videocámara, su aplicación es más efectiva a partir de los 40 cm de altura, ya que en niveles inferiores la alta transparencia del flujo dificulta la visualización y el seguimiento de las partículas. Por su parte, los flotadores se recomiendan para niveles de agua menores a 60 cm, ya que en niveles superiores la turbulencia altera su trayectoria y compromete la representatividad del dato. Finalmente, la técnica de dilución con trazador químico es aplicable hasta los 80 cm; por encima de este nivel, el arrastre de partículas de gran tamaño y velocidades superiores a 2 m/s incrementa el riesgo de daño al equipo.

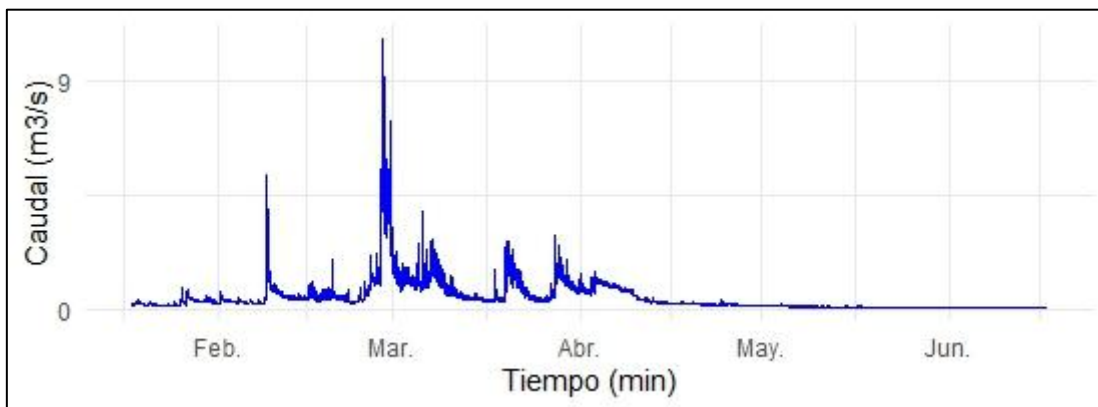
La determinación de estos rangos operativos para cada metodología permitió minimizar errores en las mediciones y optimizar la elección de la técnica más adecuada

según las condiciones hidrodinámicas del río. Estos rangos son fundamentales para asegurar una interpretación precisa de los datos y una implementación eficiente de las metodologías de aforo en el estudio hidrológico del río Luricocha, contribuyendo así a una caracterización más confiable del comportamiento del flujo en diferentes niveles de agua.

3.6. Serie de caudales

Figura 3.33

Serie de caudales finales



Con la aplicación de la ecuación hidráulica de la curva gasto líquido y la serie temporal de niveles de agua registrada, se generó la serie temporal de caudales correspondiente a la estación de Luricocha. Durante el periodo de estudio, se identificó caudales máximos y mínimos de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Estos resultados representan una fuente de información clave para la gestión eficiente de los recursos hídricos y la planificación estratégica en la cuenca.

CONCLUSIONES

1. Se logró estimar los caudales aplicando las cuatro metodologías evaluadas, obteniéndose 80 mediciones con el correntómetro, 82 con el trazador químico, 82 mediante la videocámara y 86 mediante el método del flotador, observándose variaciones significativas entre las técnicas. El correntómetro destacó por su alta precisión y consistencia, especialmente para niveles de agua inferiores a 70 cm, consolidándose como el método más confiable. La velocimetría de imágenes de partículas (PIV) demostró ser una alternativa eficiente para ríos de difícil acceso o con flujos rápidos, aunque su precisión dependió de factores externos como ángulo de grabación, la turbulencia, la calidad de las imágenes y la iluminación. Con el trazador químico se obtuvo resultados similares al correntómetro, pero su aplicación en caudales mayores requirió incrementar la cantidad de trazador, elevando los costos y la complejidad operativa. Por último, aunque el método del flotador se caracteriza por su simplicidad y bajo costo, presentó alta variabilidad en niveles superiores a 60 cm, debido a la turbulencia y a la dificultad para mantener una trayectoria representativa durante las mediciones.
2. Se definieron familias de curvas altura-gasto para cada método de aforo, lo que permitió comparar sus características y evaluar su consistencia en la representación del comportamiento hidrológico del río Luricocha. Las curvas obtenidas mediante el correntómetro evidenciaron la mayor estabilidad y precisión, con un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.92$, posicionándose como la opción más adecuada para el monitoreo continuo. La videocámara alcanzó un coeficiente de 0.90, mientras que el trazador químico obtuvo 0.82, evidenciando ligeras discrepancias atribuibles a diferencias metodológicas y a las condiciones de flujo durante la toma de datos. El flotador alcanzó un coeficiente de 0.87, pero presenta limitaciones para aplicaciones que requieran alta precisión. Finalmente, la curva de gasto consolidada, elaborada a partir de la integración de las cuatro metodologías, arrojó un coeficiente de 0.88, evidenciando un buen ajuste del modelo y confirmando la utilidad de combinar técnicas para la estimación de caudales en ríos de alta montaña.

3. Se identificaron como principales fuentes de incertidumbre los errores asociados a la calidad de imágenes, el ángulo de grabación, la turbulencia y la iluminación para el método de videocámara; las condiciones hidrológicas específicas del tramo estudiado para los métodos de correntómetro, flotador y trazador químico. La comparación entre métodos mostró que la velocimetría de imágenes presentó la mayor dispersión en caudales bajos y altos, con una incertidumbre del 31%; el trazador químico evidenció una incertidumbre del 13%, particularmente en caudales elevados, mientras que el método del flotador alcanzó una incertidumbre del 15% en caudales medios y altos, todo en referencia al desempeño del correntómetro. Al integrar los datos de las cuatro metodologías se obtuvo una incertidumbre global del 25%, reflejando las variaciones inherentes a cada técnica. En general, las discrepancias en las curvas altura-gasto fueron más notorias bajo condiciones de flujos extremos.

RECOMENDACIONES

1. Instalar estaciones hidrométricas automáticas que combinen sensores de nivel y velocidad para obtener datos más consistentes y reducir la dependencia de mediciones manuales. Ampliar el análisis a diferentes tipos de ríos y cauces (naturales y artificiales) para evaluar la adaptabilidad de cada método en diversos contextos hidrológicos.
2. Incorporar tecnologías emergentes como drones equipados con cámaras de alta resolución para realizar velocimetría de imágenes en tramos de difícil acceso y en condiciones del flujo que impidan el ingreso del hidromensor.
3. Mejorar la calidad de las imágenes mediante cámaras de alta resolución y configuraciones de iluminación optimizadas para minimizar reflejos y sombras. Asegurar la estabilidad de la cámara y una perspectiva perpendicular al flujo para evitar distorsiones en las mediciones de velocidad.
4. En la construcción de curvas altura-gasto con Hydraccess asegurar de que los datos de entrada estén depurados y validados, eliminando valores anómalos o inconsistentes que puedan distorsionar la curva. Incluir análisis de sensibilidad para evaluar cómo las diferencias en los métodos de aforo afectan la forma y pendiente de la curva.
5. Sobre la incertidumbre en las metodologías empleada, implementar análisis de propagación de incertidumbre considerando cada etapa del proceso de medición (condiciones de campo, recolección de datos, cálculos, entrada al software). Determinar los márgenes de error asociados a cada técnica y presentarlos en las curvas altura-gasto como intervalos de confianza.
6. Establecer protocolos estandarizados para cada metodología de aforo y capacitar al equipo de trabajo en su correcta implementación para reducir errores operativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdelkader, L. (2012). Análisis y comparación de metodologías de aforo de caudal en lámina libre mediante Curva de Gasto y Perfilador Acústico Doppler. Aplicación en los ríos de la región de Quebec (Canadá). Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València, Valencia (España).
- Aparicio, F. (1987). Summary for Policymakers. (E. G. Noriega, Ed.), Fundamentos de hidrología de superficie. Cuernavaca.
- Arboleda J.; Felipe O.; Yerrén J. – DHI/SPH (2018). Manual de Hidrometría Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología (DHI), Subdirección de Predicción Hidrológica (SPH).
- Bateman, A. (2007). Hidrología básica y aplicada. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos. Recuperado a partir de <http://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Bradley, A. A., Kruger, A., Meselhe, E. A., & Muste, M. (2002). Flow measurement in streams using video imagery. *Water Resources Research*, 38(12), 1315. <https://doi.org/10.1029/2002WR001317>
- Cahuana, A., Yugar, W. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233. [Trabajo Dirigido Por Adscripción, Presentado Para Optar al Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Simón Cochabamba – Bolivia]. Archivo digital. <https://docplayer.es/214749650-Universidad-mayor-de-san-simon.html>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas – CEDEX. (2004). *Manual de aforos y control de caudales*. Ministerio de Fomento, España.
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada.

- Chow, V. Te., Maidment, D. R., & Mays, L. w. (2000). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: NOMOS S. A.
- Chow, V. T. (1985). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Fattorelli S. & Fernández P. C. (2011) Diseño hidrológico (Segunda edición)
- Fortesa, J., García-Comendador, J., Calsamiglia, A., López-Tarazón, J. A., Latron, J., Alorda, B., & Estrany, J. (2019). Comparison of stage/discharge rating curves derived from different recording systems: Consequences for streamflow data and water management in a Mediterranean island. *Science of The Total Environment*, 658, 419–430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.157>
- Hersch, R. W. (2009). *Streamflow Measurement* (Tercera Ed). Taylor & Francis Group.
- Jalbert, J., Mathevet, T., & Favre, A.-C. (2011). Temporal uncertainty estimation of discharges from rating curves using a variographic analysis. *El Sevier*, 397(1-2), 83-92. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.031>
- Liu, W.-C., Huang, W.-C., & Young, C.-C. (2023). Uncertainty Analysis for Image-Based Streamflow Measurement: The Influence of Ground Control Points. *Water*, 15(1), 123. <https://doi.org/10.3390/w15010123>
- Mejía J. A. (2006) *Hidrología aplicada*. Universidad nacional agraria La Molina. Lima-Perú
- Muste, M., I. Fujita y A. Hauet (2008), *Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala para mediciones en ríos entornos*, *Recurso Hídrico. Res.*, 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950
- Ordoñez, G. J. (2011). *Aguas subterráneas - acuíferos*. Lima - Perú.
- OMM (Organismo meteorológica mundial) (2011) *Guía de prácticas hidrológicas OMM- N° 168- volumen II- (Sexta edición)*
- Patalano, A., C. M. García y A. Rodríguez (2017), *Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface*

Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV), Computers & Geosciences, Volume 109, 2017, Pages 323-330, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>.

Pérez, R. M. (2005). Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

Ponce, V. (2021). Fundamentos de la hidráulica de canales. Recuperado el 21 de enero de 2022, de <https://ponce.sdsu.edu/>

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. (1997). The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47(11), 769-784. <https://doi.org/10.2307/1313099>

Rocha, F. A. (1998). Introducción a la hidráulica fluvial. Perú.

Rosas Flores, F. S., & Tejada Flores, S. P. (2020). Estimación del caudal a partir de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala aplicado en flujo a superficie libre (Canal Carapongo Bajo, Lima, Perú). *Revista Gaceta Técnica*, 22(1), 53–65. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28763.08480>

Sosa Sarmiento, J. D. (2019). Mediciones no intrusivas en la cuenca del Chillón para soporte de la hidrometría en el Perú. *Resumen Ejecutivo, SENAMHI*.

Solange Dussaubat, Ximena Vargas (2005) “Aforo en un cauce natural”. Proyecto MECESUP UCH 0303-Universidad de Chile: Chile.

Tosi, F.; Rocca, M.; Aleotti, F.; Poggi, M.; Mattoccia, S.; Tauro, F.; Toth, E.; Grimaldi, S. Enabling image-based streamflow monitoring at the edge. *Remote Sens.* 2020, 12, 2047.

Ucha, F. (2013). Definición de Caudal. Definición ABC. Obtenido de <https://www.definicionabc.com/general/caudal.php>

Vauchel, P. (2000). Hydraccess. Recuperado a partir de <http://www.ore-hybam.org/index.php/esl/Software/Hydraccess>

Vasquez, V. A. (2016). Manejo y gestion de cuencas hidrograficas. Lima - Perú:
UNALAM.

Ven Té Chow. “Hidráulica de canales abiertos”. México, D.F., 1983

Villón, M. (2016). Hidrología Estadística (Cuarta ed.). Lima.

ANEXOS

Anexo 01. Colaboradores de la investigación

El Instituto geofísico del Perú (IGP), a través de la subdirección de Ciencias de la Atmosfera e Hidrosfera (SCAH), financio la obtención y procesamiento de información como parte de las actividades desarrollados dentro del Programa Presupuestal por Resultados N° 0089, enfocado a la “Reducción de la degradación de suelos agrarios”. Estos datos fueron empleados para la elaboración de la presente tesis de pregrado y para optar el título de Ingeniero Agrícola en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Además, el M. Sc. (c) Ing. Kithner Alfonso Espinoza Varillas, especialista de investigación en modelamiento hidrológico, hidro-sedimentología y erosión del IGP, superviso las diferentes etapas del desarrollo de la presente investigación.

- Instituto Geofísico del Perú.



Anexo 02. Panel fotográfico del trabajo del campo

Aforo con correntómetro en los distintos periodos de monitoreo



Fotografía n° 01: Mediciones de los tirantes en la sección del río.



Fotografía n° 02: Aforo con correntómetro.



Fotografía n° 05: Aforo con correntómetro.



Fotografía n° 06: Aforo con correntómetro.

Aforo con trazador químico en los distintos periodos de monitoreo



Fotografía n° 07: Medición de los 5 gramos de sal para la calibración.



Fotografía n° 8: Calibración del río Luricocha.



Fotografía n° 09: Calibración del río Luricocha.



Fotografía n° 10: Calibración del río Luricocha.



Fotografía n° 11: Preparación de la solución de 20 litros de agua con 4 kilogramos de sal.



Fotografía n° 12: Medición de la conductividad eléctrica una vez vertido la solución de 20 litros.



Fotografía n° 13: Medición de la conductividad eléctrica una vez vertido la solución de 20 litros.

Aforo con videocámara en los distintos periodos de monitoreo



Fotografía n° 14: Puntos de control para el aforo con video-cámara.



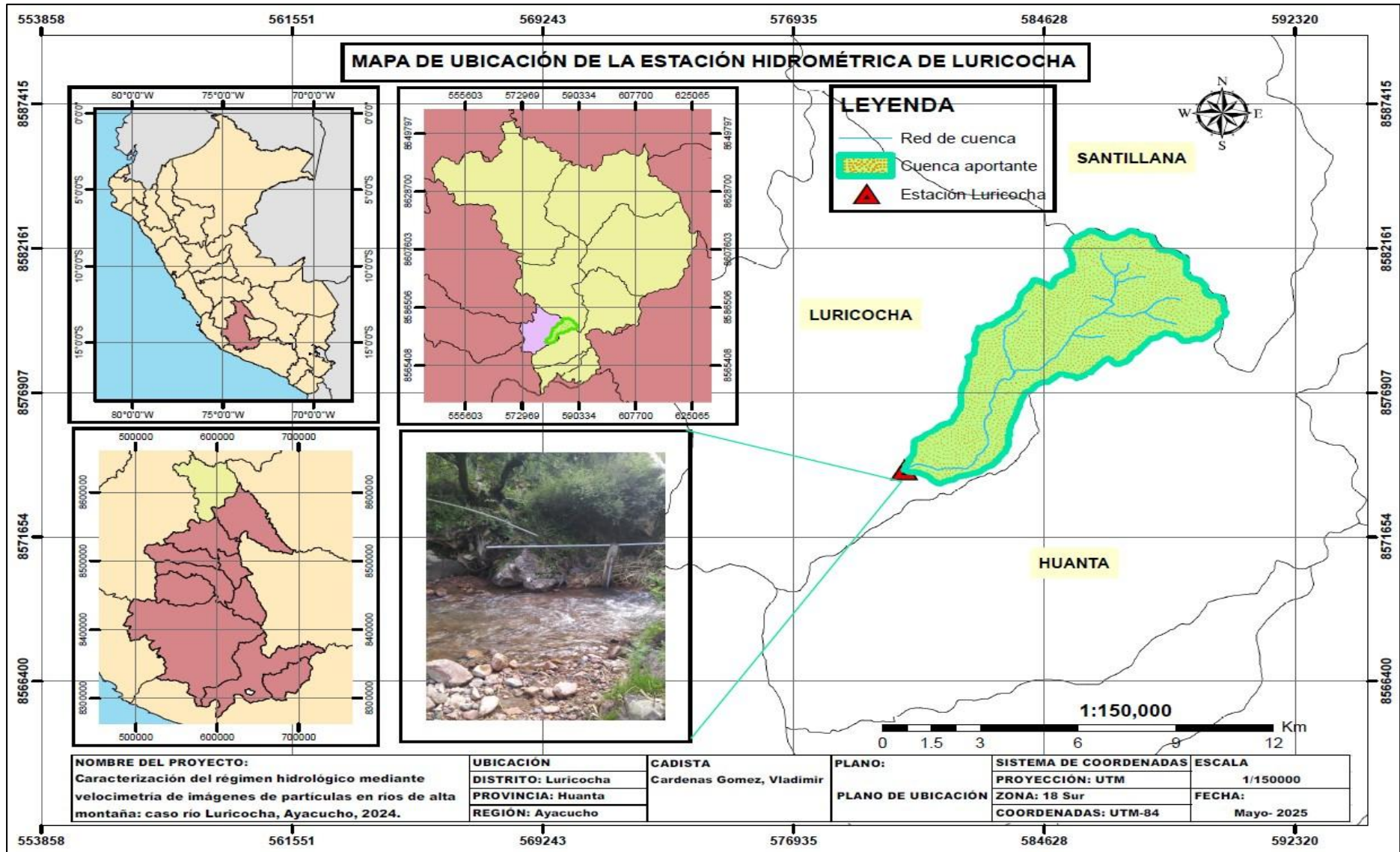
Fotografía n° 15: Aforo con video-cámara.

Aforo con flotador en los distintos periodos de monitoreo



Fotografía n° 16: Aforo flotador

Anexo 03. Mapa de ubicación



Anexo 04. Especificaciones técnicas de los equipos empleados



Medidor de flujo magnético inductivo para la medición del caudal OTT MF pro

- **Tipo de utilización**
Medidas puntuales
- **Tecnología de medición**
Electromagnético
- **Parámetros de medición**
Flujo y nivel de agua
- **Puntos destacados**
Sensor de flujo magnético inductivo con medición de profundidad para resultados fiables en aguas de poca velocidad, en condiciones de turbulencia y en cauces con muchas plantas. Requiere poco mantenimiento.
- **Margen de medición**
0 ... 6 m/s
- **Precisión**
 $\pm 2\%$ del valor medido $\pm 0,015$ m/s (0 ... 3 m/s) y $\pm 4\%$ del valor medido $\pm 0,015$ m/s (3 ... 5 m/s)

El OTT MF pro es un medidor de caudal magnético-inductivo de fácil manejo y mantenimiento reducido para la medición rentable de caudales en cauces descubiertos. El cálculo automático del caudal reduce notablemente el tiempo de permanencia en campo. El cabezal sensorial electromagnético está prácticamente exento de mantenimiento y es ideal para el uso tanto con velocidades de caudal reducidas, como con

altas concentraciones de materia en suspensión.

Medición de la velocidad	
Medición método:	Inducción magnética
Margen de medición:	0 m/s ... 6 m/s
Precisión en 0 ≤ 3 m/s:	±2% del valor medido ±0,015 m/s
Precisión en 0 ≤ 5 m/s:	±4% del valor medido ±0,015 m/s
Estabilidad en punto cero:	±0,015 m/s
Resolución:	
0,001 con un valor de medición	<10
0,01 con un valor de medición	<100
0,1 con un valor de medición	>100

Medición de la profundidad (opcional)	
Sensor de presión absoluta	con calibración de un punto
Margen de medición:	0 ... 3,05 m
Precisión:	±2% del valor medido o ±0,015 m

Métodos para medir la velocidad	
Masas de agua que fluyen:	Medición de 1,2,3,4,5 y 6 puntos, medición de hielo (1 punto y 2 puntos), medición de superficie según ISO, medición de 2 puntos según KREPS
Conductos (canalización):	0,9 x V _{máx} ; 0,2/0,4/0,8; 2D; procedimiento de integración de velocidad
Perfiles de conductos	Circular, rectangular, trapecial, ovoide 2/3, ovoide 2/3 invertido

Métodos para calcular el caudal	
EN ISO 748	métodos Mid/Mean Section
Tensión de alimentación	Batería de iones de litio
Duración:	normalmente 18 horas (20 °C)
Capacidad de la memoria de datos	Hasta 10 estaciones de medición con 32 perfiles

Temperatura de servicio/almacenamiento	- 20°C ... +60°C
--	------------------

Display del mando portátil	
Display gráfico en color, transreflectivo	LCD 3.5', QVGA
Interfaz del mando portátil	USB, tipo mini-B, 5 polos
Formato de exportación	Formato de archivo TSV (valores separados por tabulaciones)
Modos de servicio	Medición de la velocidad en tiempo real Perfil de la corriente (masa de agua que fluye/conducto)

2-3

We reserve the right to make technical changes and improvements without notice. V-25/05/2025
OTT Hydromet GmbH, Germany

Supresión del ruido	50 Hz, 60 Hz (regulable)
Longitudes de cable	2 m, 6 m, 12 m y 30 m

Material	
Carcasa del sensor:	ABS, reforzado con fibra de vidrio
Mando portátil:	policarbonato recubierto con elastómero absorbente

Dimensiones y peso	
Cuerpo del sensor:	
Dimensiones	11,9 cm x 4,3 cm x 6,3 cm
Peso:	0,5 kg (con 6 m de cable)
Mando portátil:	
Dimensiones:	21,8 cm x 9,3 cm x 5,3 cm
Peso:	0,68 kg

Grado de protección IP	
Sensor:	IP68
Mando p.:	IP67 (con tapa de protección)



One cable design simplifies field sampling

Micro USB On-The-Go connector for connecting to PC, recharging, and backing up data to USB flash drive

Optional depth sensor for profiling studies*

Long-life, rechargeable lithium-ion battery
Optional built-in GPS sensor

Digital sensors are auto-recognized and displayed; color screen with graphing

Large memory stores over 100,000 data sets and 400 GLP records. 100 user-defined sites and 100 data IDs for easy data management

Backlit keypad for use in any lighting condition

Universal sensor ports - accepts any 4 ProDSS sensors*

Detailed on-screen Help function

Titanium sensors for maximum durability*

Rubber over-molded case provides extra protection and prevents slipping; provides an IP-67 (waterproof) rating with or without battery cover

MS (military-spec) metal connectors - rugged, waterproof, keyed, bayonet style lock

Rugged field cable features 2-year warranty
Up to 100 meter cable lengths available

Multiple weights can be installed at the bottom of the sensor guard

**Only available on 4 port cable assemblies.
ProDSS 4 port cable and titanium sensors shown.
Inline ODO/CT cable assembly also available.*

ProDSS System Specifications (Instrument, Sensor, and Cable)

Sensor/Parameter	Sensor Type/Measurement Method	Range	Accuracy	Resolution	Units
Temperature	Thermistor, installed on conductivity sensor	-5 to 70 °C (temperature compensation range for DO mg/L measurement: -5 to 50 °C)	±0.2 °C	0.1 °C or 0.1 °F (user selectable)	°C, °F, K
pH	Combination glass bulb electrode, Ag/AgCl reference electrode with gelled electrolyte	0 to 14 pH units	±0.2 pH units	0.01 pH units	pH, pH mV
ORP	Platinum button with Ag/AgCl reference	-1999 to 1999 mV	±20 mV	0.1 mV	mV
Dissolved Oxygen	Optical luminescence - lifetime method	0 to 500%, 0 to 50 mg/L	0 to 200%: ±1% of reading or 1% saturation, whichever is greater 200 to 500%: ±8% of reading 0 to 20 mg/L: ±0.1 mg/L or 1% of reading, whichever is greater 20 to 50 mg/L: ±8% of reading	0.01 mg/L and 0.1%, or 0.1 mg/L and 1% (user selectable)	% saturation, % saturation local, mg/L, ppm
Barometer	-	375 to 825 mmHg	±1.5 mmHg from 0 to 50 °C	0.1 mmHg	mmHg, inHg, mbar, psi, kPa, atm
Conductivity	Four nickel electrode cell	0 to 200 mS/cm	0 - 100 mS/cm: ±0.5% of reading or .001 mS/cm, whichever is greater 100 - 200 mS/cm: ±1.0% of reading	0.001, 0.01 or 0.1 µS/cm (range dependent)	µS/cm, mS/cm
Specific Conductance*	Calculated from conductivity and temperature	0 to 200 mS/cm	0 - 100 mS/cm: ±0.5% of reading or .001 mS/cm, whichever is greater 100 - 200 mS/cm: ±1.0% of reading. User selectable reference temperature (15 to 25 °C; default 25 °C) and compensation coefficient (0 to 4%/°C; default 1.91%)	0.001, 0.01, 0.1 mS/cm	µS/cm or mS/cm
Salinity*	Calculated from conductivity and temperature	0 to 70 ppt	±1.0% of reading or ±0.1 ppt, whichever is greater	0.01 ppt	ppt or PSU
Total Dissolved Solids (TDS)*	Calculated from specific conductance and a user-selectable TDS multiplier (0.30 to 1.00; default 0.65)	0 to 100 g/L	Calculated from specific conductance and a user-selectable TDS multiplier (0.30 to 1.00; default 0.65)	0.001, 0.01, 0.1 g/L	mg/L, g/L, kg/L
Resistivity*	Calculated from conductivity and temperature	0 to 2 Mohms	±0.1% Full Scale	0.001, 0.01, 0.1 ohms	ohm-cm, kohm-cm, Mohm-cm
Seawater Density*	Sigma is calculated from salinity, temperature, and pressure (depth) Sigma T is calculated from salinity and temperature	0.0 to 50.0 sigma, sigma T	-	0.1 sigma or sigma T	Sigma, Sigma T
Turbidity	Nephelometric - Optical, 90° scatter Meets ISO 7027	0 to 4000 FNU	0 to 999 FNU: 0.3 FNU or ±2% of reading, whichever is greater 1000 to 4000 FNU: ±5% of reading	0.1 FNU	FNU, NTU
Total Suspended Solids (TSS)*	User correlated from turbidity field measurements and lab TSS measurements from grab samples	0 to 30000 mg/L	User correlated from turbidity field measurements and lab TSS measurements from grab samples	0.01, 0.1 mg/L	mg/L
Ammonium**	Ion selective electrode	0 to 200 mg/L NH ₄ -N	±10% of reading or 2 mg/L, whichever is greater	0.01 mg/L	NH ₄ -N mg/L, NH ₄ -N mV
Ammonia*	Calculated from ammonium, temperature, salinity, and pH	0 to 200 mg/L NH ₃ -N	-	0.01 mg/L	NH ₃ -N mg/L
Chloride**	Ion selective electrode	0 to 18000 mg/L Cl	±15% of reading or 5 mg/L, whichever is greater	0.01 mg/L	Cl mg/L, Cl mV
Nitrate**	Ion selective electrode	0 to 200 mg/L NO ₃ -N	±10% of reading or 2 mg/L, whichever is greater	0.01 mg/L	NO ₃ -N mg/L, NO ₃ -N mV
Depth	Pressure transducer	0 to 328 feet (0 to 100 m)	±0.013 ft (±0.004 m) for 1, 4, and 10 m cables ±0.13 ft (±0.04 m) for cables 20 m and longer	0.001 m or 0.01 ft	m, ft

*Derived/calculated parameter

**ISEs for freshwater only; 20-meter maximum depth

**UNSCH**FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. VLADIMIR CARDENAS GOMEZ
R.D. N° 149-2025-UNSCH-FCA-D


En la ciudad de Ayacucho a los once días del mes de julio del año dos mil veinticinco, siendo las diez horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por la Ing. Efraín Chuchón Prado, M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán como asesor, Dr. Eleazar Chuchón Angulo y el Ing. Herbert Núñez Alfaro; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Caracterización del régimen hidrológico mediante velocimetría de imágenes de partículas en ríos de alta montaña: caso río Luricocha, Ayacucho, 2024**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por el Bachiller **VLADIMIR CARDENAS GOMEZ**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Ing. Efraín Chuchón Prado	16	16	16	16
M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán	18	18	18	18
Dr. Eleazar Chuchón Angulo	18	18	18	18
Ing. Herbert Núñez Alfaro	17	17	17	17
PROMEDIO GENERAL				17


Acto seguido se invita al sustentante y publico en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.


.....
Ing. Efraín Chuchón Prado
Presidente


.....
M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán
Asesor


.....
Dr. Eleazar Chuchón Angulo
Jurado


.....
Ing. Herbert Núñez Alfaro
Jurado


.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

**UNSCH**FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativisar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.D. N° 226-2025-UNSCH-FCA-D, de fecha 19 de agosto de 2025; hace constar que el trabajo titulado;

Caracterización del régimen hidrológico mediante velocimetría de imágenes de partículas en ríos de alta montaña: caso río Luricocha, Ayacucho, 2024

Autor : Vladimir Cardenas Gomez

Asesor : César Vidal Gutiérrez Ninahuamán

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de Tesis, aprobado mediante la RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de doce por ciento **(12 %)** de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajos estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 2735692711

Ayacucho, 26 de agosto de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias

Ing. Eder Fenorio Mancilla
Coordinador de Control de originalidad de
trabajo de investigación - FCA

Caracterización del régimen hidrológico mediante velocimetría de imágenes de partículas en ríos de alta montaña: caso río Luricocha, Ayacucho, 2024

por Vladimir Cardenas Gomez

Fecha de entrega: 26-ago-2025 12:15p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2735692711

Nombre del archivo: TESIS_VCG_Versión_final.docx (21.13M)

Total de palabras: 19084

Total de caracteres: 103554

Caracterización del régimen hidrológico mediante velocimetría de imágenes de partículas en ríos de alta montaña: caso río Luricocha, Ayacucho, 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina Trabajo del estudiante	2%
3	dokumen.site Fuente de Internet	1%
4	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unesum.edu.ec Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.senamhi.gob.pe Fuente de Internet	<1%

9	nanopdf.com Fuente de Internet	<1 %
10	pdfcoffee.com Fuente de Internet	<1 %
11	liniamikulowaczarna.pl Fuente de Internet	<1 %
12	Submitted to Universidad Catolica De Cuenca Trabajo del estudiante	<1 %
13	it.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
14	RAYMUNDO BARRALES GUADARRAMA. "MONITORIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS Y MEDIOAMBIENTALES RELACIONADOS CON EL TRÁFICO DE VEHÍCULOS. SENSORES CLIMÁTICOS Y MEDIOAMBIENTALES INALÁMBRICOS PARA SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE", Universitat Politecnica de Valencia, 2016 Publicación	<1 %
15	repositorio.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

Caracterización del régimen hidrológico mediante velocimetría de imágenes de partículas en ríos de alta montaña: caso río Luricocha, Ayacucho, 2024

Vladimir Cardenas Gomez¹ cardenas@unsch.edu.pe

César Vidal Gutiérrez Ninahuamán² cesar.gutierrez@unsch.edu.pe

Kithner Alfonso Espinoza Varillas³ alfonso.e08@gmail.com

Área de investigación: Medio ambiente

Línea de investigación: Hidrología e hidráulica

RESUMEN

Este estudio caracteriza el régimen hidrológico del río Luricocha (Ayacucho, Perú) mediante la aplicación de la velocimetría de imágenes de partículas (PIV) como técnica innovadora para la estimación de caudales en ríos de alta montaña. Se evaluaron cuatro metodologías de aforo (correntómetro, trazador químico, PIV y flotador) y se construyeron curvas altura-gasto con el software Hydraccess, a partir de 328 mediciones. Los resultados mostraron que el correntómetro presentó el mejor desempeño ($R^2 = 0.92$), mientras que la PIV alcanzó un ajuste comparable ($R^2 = 0.90$), con ventajas en zonas de difícil acceso, aunque con mayor incertidumbre (31%). El trazador químico resultó adecuado en caudales bajos y el flotador evidenció limitaciones por la turbulencia superficial. La integración de las metodologías permitió ajustar una curva de gasto global ($R^2 = 0.88$) con incertidumbre (25%), validada con $R^2 = 0.87$, RMSE = 0.27 m³/s y PBIAS = -4.03%. Estos resultados evidencian el potencial de la PIV como herramienta complementaria en el monitoreo hidrológico de ríos de montaña y resaltan la necesidad de incorporar la evaluación de incertidumbre en la gestión hídrica bajo escenarios de flujo extremo.

Palabras clave: Régimen hidrológico, velocimetría de imágenes de partículas, Estimación de caudales, curva altura-gasto, Incertidumbre.

ABSTRACT

This study characterizes the hydrological regime of the Luricocha River (Ayacucho, Peru) through the application of particle image velocimetry (PIV) as an innovative technique for estimating flow in high mountain rivers. Four gauging methodologies were evaluated (current meter, chemical tracer, PIV and float) and height-flow curves were constructed with the Hydraccess software, based on 328 measurements. The results showed that the current meter presented the best performance ($R^2 = 0.92$), while the PIV achieved a comparable adjustment ($R^2 = 0.90$), with advantages in areas that are difficult to access, although with greater uncertainty (31%). The chemical tracer was adequate at low flow rates and the float showed limitations due to surface turbulence. The integration of the methodologies allowed the adjustment of a global expenditure curve ($R^2 = 0.88$) with uncertainty (25%), validated with $R^2 = 0.87$, RMSE = 0.27 m³/s and PBIAS = -4.03%. These results demonstrate the potential of PIV as a complementary tool in the hydrological monitoring of mountain rivers and highlight the need to incorporate uncertainty assessment in water management under extreme flow scenarios.

Keywords: Hydrological regime, particle image velocimetry, Flow estimation, Head-flow curve, Uncertainty.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de los regímenes hidrológicos en cuencas de alta montaña constituye una prioridad para la gestión sostenible del agua, especialmente en un contexto de creciente variabilidad climática y mayor ocurrencia de eventos extremos. Estas zonas cumplen un papel fundamental en la regulación del ciclo hidrológico, al aportar caudales a los sistemas fluviales que abastecen de recursos hídricos a poblaciones locales y regionales. Sin embargo, la limitada disponibilidad de datos hidrométricos en áreas de difícil acceso ha representado una barrera significativa para comprender con precisión la dinámica de los caudales en estos entornos.

En este escenario, la velocimetría de imágenes de partículas (PIV) ha emergido como una técnica innovadora y no intrusiva que permite medir con alta precisión la velocidad superficial del flujo a partir de secuencias de imágenes. Si bien su aplicación se consolidó inicialmente en entornos controlados de laboratorio, en los últimos años se ha adaptado con éxito a escenarios naturales, especialmente mediante el uso de cámaras montadas en drones o estructuras fijas. Diversos estudios (Tauro et al., 2016; Eltner et al., 2020) han demostrado que la PIV puede generar resultados robustos incluso en ríos con alta complejidad hidráulica, lo que la posiciona como una alternativa viable para el monitoreo en cuencas montañosas.

En este marco, el presente estudio aplica la técnica de PIV para la caracterización del régimen hidrológico del río Luricocha, ubicado en la región de Ayacucho, Perú. Además de evaluar la precisión de esta técnica en comparación con métodos convencionales, la investigación busca aportar evidencia para mejorar la gestión integral del recurso hídrico en la zona. Los resultados obtenidos constituyen un insumo relevante para la planificación y predicción de escenarios hidrológicos extremos, tales

como sequías e inundaciones, con implicancias directas en la sostenibilidad ambiental y en el bienestar de las comunidades locales.

II. METODOLOGÍA

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

Caracterizar el régimen hidrológico mediante velocimetría de imágenes de partículas en ríos de alta montaña: caso del río Luricocha, provincia de Huanta del departamento de Ayacucho, 2024.

2.1.2. Objetivo específico

Estimar los caudales mediante los diversos métodos de aforo: correntómetro, trazador químico, velocimetría de imágenes de partículas y flotador.

Definir las familias de curva altura-gasto a partir de los caudales generados por las diversas metodologías de aforo utilizando el software Hydraccess.

Determinar la incertidumbre entre las técnicas de velocimetría de imágenes de partículas, correntómetro y trazador químico en la construcción de curva altura gasto.

2.2. Ubicación de la zona de estudio

El estudio se realizó en el río Luricocha, ubicado en la provincia de Huanta, región de Ayacucho. El punto exacto del estudio donde se instaló los sensores de nivel de agua se encuentra en las coordenadas UTM E: 580333.4 N: 8574113.1 Z: 2748msnm. Este río de alta montaña forma parte de la cuenca hidrográfica del río Cachi y es una fuente hídrica fundamental para las comunidades locales. La cuenca presenta una topografía accidentada, con elevaciones significativas y un clima estacional, caracterizado por intensas lluvias en la temporada húmeda (diciembre a marzo) y sequía prolongada en los meses secos (mayo a septiembre). Esta variabilidad climática genera fluctuaciones

notables en el caudal del río, lo cual impacta su régimen hidrológico.

Figura 1.

Ubicación departamental, provincial, y distrital de la estación hidrométrica de Luricocha, Huanta.

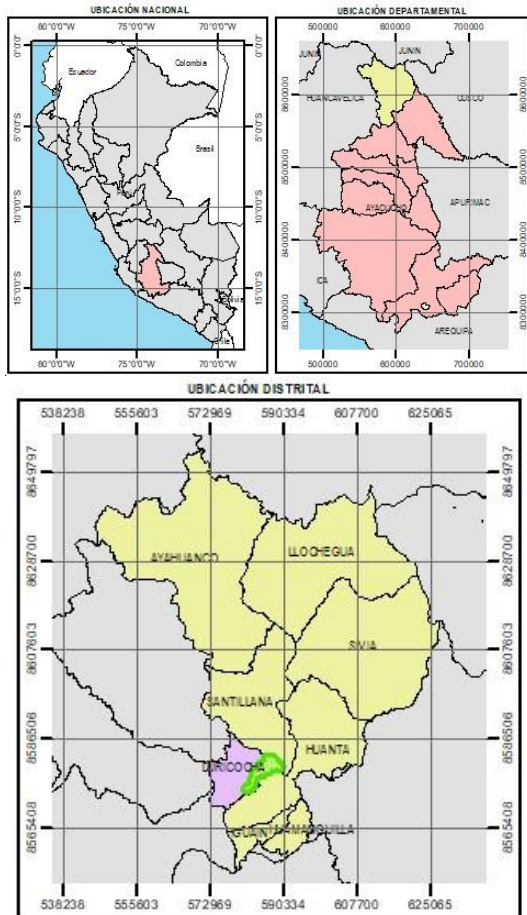


Figura 2.

Área de influencia al punto de aforo.



Fuente: Google Earth

La selección del río Luricocha como área de estudio responde a la necesidad de comprender mejor los patrones hidrológicos

en ríos de alta montaña. Este río presenta condiciones ideales para aplicar la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) debido a su flujo turbulento y pendientes pronunciadas, lo cual permitirá caracterizar la dinámica del flujo y su velocidad en un contexto de alta montaña.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

- Correntómetro electromagnético OTT MF Pro
- Medidor multiparámetro (Hanna)
- Sonda multiparamétrica ProDSS (YSI)
- Cámara de video
- Flotadores
- Sensor Levellogger
- Sensor Barologger
- Wincha
- Flexómetro
- Cordel
- Regla metálica de 60cm
- Traje impermeable
- Libreta de apuntes
- Laptop
- Spray (pintura)

3.2. Metodología

El presente estudio está dividido en dos etapas: trabajo de campo y Gabinete. En la primera etapa, se realizó el reconocimiento de campo, ubicación del punto de control e instalación de sensores hidrométricos, mediciones hidrométricas con correntómetro, disolución, video-cámara y flotador. En la etapa de trabajo de gabinete, se llevó a cabo el procesamiento de datos hidrométricos (aforos con las distintas metodologías), análisis y tratamiento de la información con Hydraccess, generación de curva de gasto y familia de curva de gasto con Hydraccess y la estimación de la incertidumbre.

3.2.1. Aforo con videocámara

El aforo mediante video-cámara se realizó seleccionando un tramo representativo del cauce, garantizando buena visibilidad y

condiciones de flujo uniformes. Posteriormente, se colocaron cuatro puntos de control (dos en cada margen) y se midieron sus distancias, lo que permitió ortorrectificar las imágenes y mejorar la precisión en el cálculo de las velocidades de flujo. Finalmente, la cámara se instaló en una posición elevada y estable, con un ángulo que cubriera toda la sección transversal del río; se configuró para grabar en alta resolución y con una velocidad de fotogramas adecuada, registrándose además el nivel de agua, las condiciones del cauce y la hora de grabación.

Figura 3.

Puntos de control para el aforo con videocámara

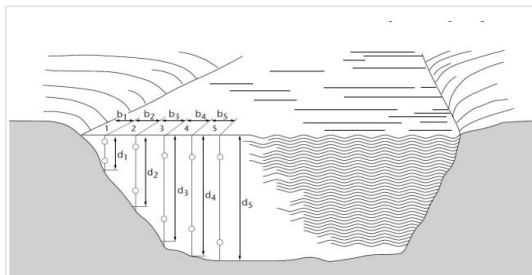


3.2.2. Aforo con correntómetro

Para el aforo con correntómetro, se utiliza el método área velocidad. Para el caso de las actividades hidrológicas, el área se determina mediante sondeos de las profundidades a tramos constantes, y a lo ancho de la sección de control; la velocidad se determina utilizando equipos como molinete y/o sensores de velocidad (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

Figura 4.

Puntos de control para el aforo con videocámara



Fuente: Guía de practica hidrológicas OMM N° 168

3.2.3. Aforo con trazador químico

Se preparó una solución de 20 litros de agua con 4 kg de sal, la cual se vertió instantáneamente en el cauce a 80 m aguas arriba del punto de control para asegurar su dispersión. En dicho punto, se registraron variaciones de conductividad cada segundo, datos que permitieron calcular el caudal mediante el método de dilución de sal y la calibración inicial correspondiente.

Figura 5.

Puntos de control para el aforo con videocámara

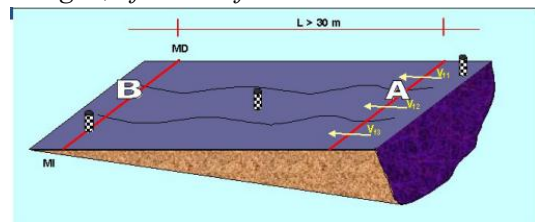


3.2.4. Aforo con flotador

Este método implica usar objetos flotantes para medir el tiempo que tarda en recorrer una distancia determinada, estimando así la velocidad superficial y el caudal del agua. Los flotadores pueden ser elementos naturales o artificiales, como trozos de madera o botellas plásticas con agua. (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

Figura 6.

Tramo en la sección de control en un curso de agua, aforo con flotadores



Fuente: (SENAMHI-DHI/SPH, 2018).

3.2.5. Mediciones del nivel de agua

Existen diferentes formas de medir el nivel de agua en una estación hidrométrica. Se puede realizar en horarios establecidos o en forma continua mediante equipos registradores o

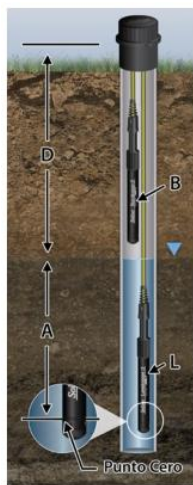
sensores de nivel de agua. En el primer caso se procede a utilizar una regla limnimétrica, instrumentos segmentados con graduaciones en centímetros, pintados en el alto relieve, Para el caso de estudio se emplearon los sensores levellogger y barologger.

3.2.6. Sensores levellogger y barologger

Los levelloggers son registradores de datos que miden y almacenan información de nivel operan midiendo la presión absoluta, que es la suma de la presión de agua y la presión atmosférica. Para obtener mediciones precisas del nivel del nivel de agua, fue esencial compensar las variaciones en la presión barométrica. Aquí es donde intervienen los Barologgers, que registran exclusivamente la presión atmosférica. Al combinar los datos de ambos dispositivos, se pueden corregir las mediciones del Leveloger para reflejar únicamente la presión ejercida por la columna de agua (Solinst, 2024).

Figura 7.

Puntos de control para el aforo con videocámara



Fuente: Solinst, (2024)

3.2.7. Procesamiento y análisis de la información hidrológica con Hydraccess.

La información hidrológica recopilada en la estación hidrométrica fue incorporada a una base de datos del software Hydraccess. Los datos ingresados fueron caudales

instantáneos de correntómetro, trazador químico, flotador y videocámara, y cotas instantáneas.

3.2.8. Generación de curvas de gasto

Una vez incorporado y procesado los aforos se procedió con la generación de curva de gasto para cada metodología, para ello se empleó el software hydraccess.

3.2.9. Evaluación de la incertidumbre global

Di Baldassarre y Montanari (2009) observaron que las principales fuentes de error que afectan al caudal son el error en las mediciones del caudal (ϵ_1); y el error debido a la incertidumbre de SDRC que a su vez es inducida por su error de interpolación y extrapolación, la presencia de condiciones de flujo inestable y cambios estacionales de rugosidad. Estos autores asumieron que la incertidumbre global puede obtenerse mediante.

$$\epsilon(Q(x, t)) = \pm \epsilon_1(Q(x, t)) + \epsilon_2(Q(x, t))$$

Evaluación de la incertidumbre de las mediciones de descarga (ϵ_1)

La fuente inicial de error resulta de las mediciones Q . Para cuantificar esta incertidumbre, la norma europea ISO EN 748 (1997) ofrece una metodología para cuantificar estos errores con un nivel de confianza del 95%.

$$\epsilon_1 = \pm \sqrt{X_A^2 + \frac{1}{m}(X_e^2 + X_c^2 + X_b^2 + X_d^2 + X_p^2)}$$

X_A : Error debido a la elección del número de puntos en una vertical.

X_e : Error debido a la elección de la duración de exposición del molinete.

X_b : Error en la medición del ancho.

X_d : Error en la medición de la profundidad.

X_p : Error debido a la cantidad de verticales.

Evaluación de la incertidumbre de descarga en las curvas de clasificación de caudal por etapas (SDRC).

La incertidumbre de SDRC se basa en el concepto de que el nivel de agua es incierto a

través de sus propios errores de medición. Tomkins (2014) analizó la incertidumbre de SDRC en los valores de caudales estimados directamente a partir de las mediciones y su correspondencia dentro de los SDRC. De esta manera, se estimó la desviación relativa de las mediciones con respecto al SDRC correspondiente para obtener la incertidumbre entre los valores de caudal.

$$\varepsilon_2 = \left[\frac{Q_g - Q_{rc}}{Q_{rc}} \right] * 100$$

Donde:

Qo: Caudal observado

Qrc: Caudal generado con la curva de gasto.

Esta ε_2 (%) indica el grado de ajuste entre el caudal directamente estimado a partir de las mediciones de campo y el caudal predicho a partir de la ecuación de curva de gasto para cada medición individual. Los resultados pueden clasificarse como buenos para $\varepsilon_2 = \pm 10\%$; aceptable $\pm 11-20\%$; dudoso $\pm 21-50\%$ y subestimado o sobreestimado $\geq \pm 50\%$ (Tomkins, 2014).

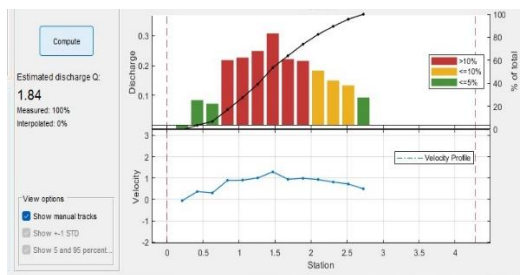
Figura 8.

Procesamiento de aforos con el software River.



Figura 9.

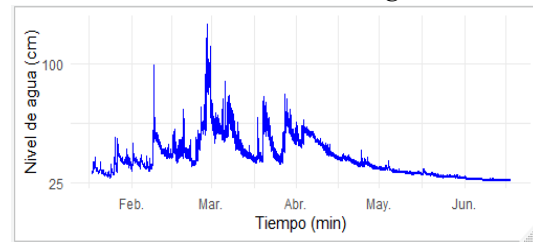
Generación de caudales con el software River.



IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Figura 8.

Análisis de serie de niveles de agua

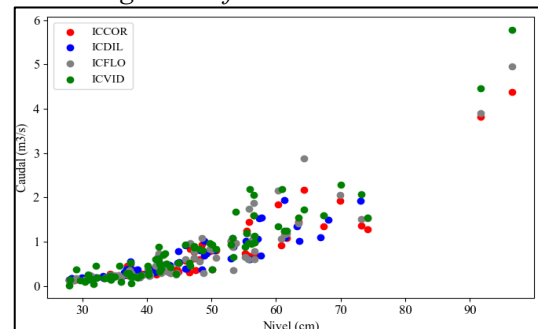


La gráfica presentada muestra la evolución temporal del nivel de agua, del río Luricocha durante el periodo comprendido entre el 17 de enero y el 17 de junio de 2024. En este intervalo, se registraron un total de 218,586 mediciones de los niveles de agua a una escala temporal de un minuto, lo que permite un análisis detallado de las dinámicas hidrológicas del río.

En el periodo inicial (febrero a marzo), se observa un incremento notable en los niveles de agua, con picos que superan los 120 cm, asociados a lluvias intensas propias de la temporada de precipitaciones en esta región, lo que genera una alta dinámica hidrológica caracterizada por crecidas abruptas y descensos rápidos. A partir de abril, los niveles máximos disminuyen gradualmente, con menor frecuencia de picos altos, y hacia mayo y junio se estabilizan en valores más bajos, cercanos a los 25 cm, evidenciando la transición hacia la temporada seca, un patrón típico de los ríos de alta montaña.

Figura 9.

Diagrama de dispersión de las distintas metodologías de aforo

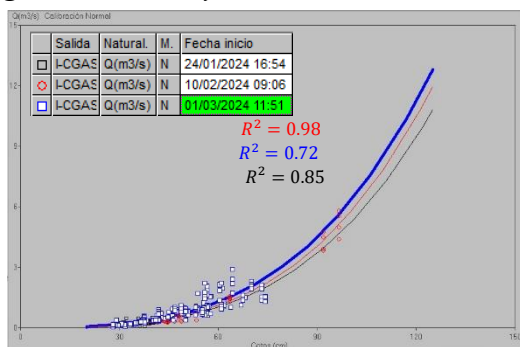


Fuente: Elaboración propia con los datos del Instituto geofísico del Perú (IGP, 2024)

En la figura 3.19 se presenta la dispersión de datos de nivel de agua y caudal obtenidos mediante cuatro metodologías: correntómetro (ICCOR), dilución con trazadores (ICDIL), flotador (ICFLO) y videocámara (ICVID). Estos resultados corresponden a las mediciones realizadas durante la campaña de aforo en el río Luricocha, reflejando las estimaciones de caudal para una amplia gama de niveles de agua, desde valores bajos hasta máximos registrados.

Se observa que en general, todas las metodologías muestran un comportamiento creciente del caudal con el aumento del nivel de agua, lo que es consistente con la dinámica hidráulica esperada. Sin embargo, existen diferencias en las estimaciones entre los métodos, siendo más evidentes en niveles altos, donde algunas metodologías, como el flotador y la videocámara, tienden a presentar mayor dispersión. Estas variaciones reflejan las particularidades y limitaciones técnicas de cada método, subrayando la importancia de su selección según las condiciones específicas del río y los objetivos del estudio.

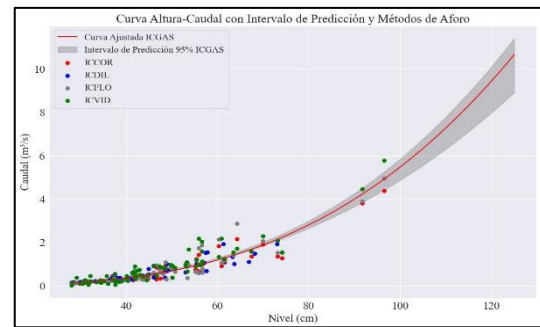
Figura 10.
Familias de curva altura gasto generadas en Hydracess.



Tras la actualización de los aforos correspondientes al periodo 24/01/24 al 31/04/24 en la base de datos Hydracces del IGP, se generaron las curvas de gasto. Considerando la dinámica geomorfológica de la sección de aforo y el análisis batimétrico temporal previamente descrito, se evaluó la presencia de distintas familias de curvas de tendencia durante este lapso. En la Figura 3.20 se presentan las tres familias de curvas

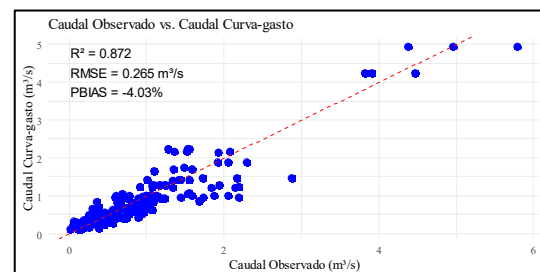
generadas en el periodo de estudio, mostrando que las tres siguen una tendencia de tipo potencial. La curva azul corresponde a los aforos realizados del 01/03/24 al 31/04/24, la curva roja representa los aforos del 10/02/24 al 31/02/24, y la curva negra abarca el periodo del 24/01/24 al 09/02/24.

Figura 11.
Incertidumbre en la estimación del caudal.



La gráfica 3.25 muestra una curva extrapolada con los datos de las 4 metodologías empleados, junto con el intervalo de predicción del 95%, lo que indica el rango dentro del cual se espera que caigan los valores de caudal con un 95% de confianza. Al observar el intervalo de predicción para un nivel de agua 125 cm (nivel máximo registrado), se tiene un rango de incertidumbre superior a 2 m³/s que representa el 25%. La amplitud de este intervalo refleja la variabilidad en los caudales estimados y la incertidumbre asociada la dispersión de los puntos de medición.

Figura 12.
Correlación de caudal observado vs el caudal del modelo.

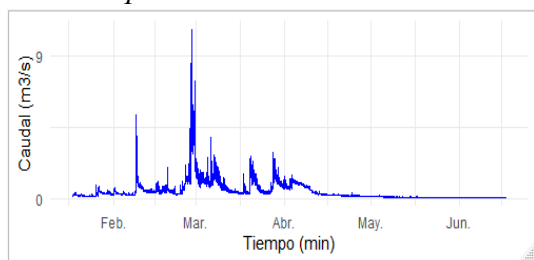


El modelo de la figura 3.30 presentó un buen desempeño general, con un coeficiente de determinación de $R^2=0.9$, lo que indica que reproduce adecuadamente la variabilidad de

los caudales observados. El error cuadrático medio (RMSE) fue de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$, reflejando una precisión aceptable en las estimaciones. El sesgo porcentual (PBIAS) fue de -4.0% , señalando una leve tendencia del modelo a sobreestimar los caudales, aunque dentro de márgenes aceptables. En conjunto, estas métricas indican que el modelo es confiable para la simulación hidrológica en la zona de estudio.

Figura 13.

Serie temporal de caudales.



Con la aplicación de la ecuación hidráulica de la curva gasto líquido y de la serie de niveles de agua registrada, se generó la serie de caudales correspondiente a la estación de Luricocha. Durante el periodo de estudio, se identificó caudales máximos y mínimos de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Estos resultados representan una fuente de información clave para la gestión eficiente de los recursos hídricos y la planificación estratégica en la cuenca.

CONCLUSIONES

1. Se estimaron caudales mediante cuatro metodologías: correntómetro (80 mediciones), trazador químico (82), PIV (82) y flotador (86). El correntómetro fue el más preciso y consistente en niveles $<70 \text{ cm}$, la PIV resultó una alternativa eficaz en ríos de difícil acceso, el trazador químico funcionó mejor en caudales bajos y el flotador presentó mayor variabilidad en niveles $>60 \text{ cm}$.
2. Se construyeron curvas altura-gasto para cada técnica, obteniéndose los siguientes ajustes: correntómetro ($R^2 =$

0.92), PIV (0.90), flotador (0.87) y trazador químico (0.82). La curva integrada de las cuatro metodologías alcanzó un $R^2 = 0.88$, lo que respalda la utilidad de combinar métodos para una estimación más robusta.

3. La incertidumbre relativa al correntómetro mostró valores de 31% para la PIV, 15% para el flotador y 13% para el trazador químico. La integración de las cuatro metodologías arrojó una incertidumbre global del 25% , siendo más notoria en condiciones de caudales extremos.

REFERENCIAS

- Abdelkader, L. (2012). Análisis y comparación de metodologías de aforo de caudal en lámina libre mediante Curva de Gasto y Perfilador Acústico Doppler. Aplicación en los ríos de la región de Quebec (Canadá). Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València, Valencia (España).
- Aparicio, F. (1987). Summary for Policymakers. (E. G. Noriega, Ed.), Fundamentos de hidrología de superficie. Cuernavaca.
- Arboleda J.; Felipe O.; Yerrén J. – DHI/SPH (2018). Manual de Hidrometría Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología (DHI), Subdirección de Predicción Hidrológica (SPH).
- Bateman, A. (2007). Hidrología básica y aplicada. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos. Recuperado a partir de <http://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Bradley, A. A., Kruger, A., Meselhe, E. A., & Muste, M. (2002). Flow measurement in streams using video

- imagery. *Water Resources Research*, 38(12), 1315. <https://doi.org/10.1029/2002WR001317>
- Cahuana, A., Yugar, W. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233. [Trabajo Dirigido Por Adscripción, Presentado Para Optar al Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Simón Cochabamba – Bolivia]. Archivo digital. <https://docplayer.es/214749650-Universidad-mayor-de-san-simon.html>
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas – CEDEX. (2004). *Manual de aforos y control de caudales*. Ministerio de Fomento, España.
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- Chow, V. T. (1985). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Fattorelli S. & Fernández P. C. (2011) *Diseño hidrológico (Segunda edición)*
- Fortesa, J., García-Comendador, J., Calsamiglia, A., López-Tarazón, J. A., Latron, J., Alorda, B., & Estrany, J. (2019). Comparison of stage/discharge rating curves derived from different recording systems: Consequences for streamflow data and water management in a Mediterranean island. *Science of The Total Environment*, 658, 419–430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.157>
- Hersch, R. W. (2009). *Streamflow Measurement (Tercera Ed)*. Taylor & Francis Group.
- Jalbert, J., Mathevet, T., & Favre, A.-C. (2011). Temporal uncertainty estimation of discharges from rating curves using a variographic analysis. *El Sevier*, 397(1-2), 83-92. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.031>
- Liu, W.-C., Huang, W.-C., & Young, C.-C. (2023). Uncertainty Analysis for Image-Based Streamflow Measurement: The Influence of Ground Control Points. *Water*, 15(1), 123. <https://doi.org/10.3390/w15010123>
- Mejía J. A. (2006) *Hidrología aplicada*. Universidad nacional agraria La Molina. Lima-Perú
- Muste, M., I. Fujita y A. Hauet (2008), *Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala para mediciones en ríos entornos*, Recurso Hídrico. Res., 44, W00D19, doi:10.1029/2008WR006950
- Ordoñez, G. J. (2011). *Aguas subterráneas - acuíferos*. Lima - Perú.
- OMM (Organismo meteorológica mundial) (2011) *Guía de prácticas hidrológicas OMM-Nº 168- volumen II- (Sexta edición)*
- Patalano, A., C. M. García y A. Rodríguez (2017), *Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)*, *Computers & Geosciences*, Volume 109, 2017, Pages 323-330, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>.
- Pérez, R. M. (2005). *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
- Ponce, V. (2021). *Fundamentos de la hidráulica de canales*. Recuperado el

- 21 de enero de 2022, de <https://ponce.sdsu.edu/>
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. (1997). The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47(11), 769-784.
<https://doi.org/10.2307/1313099>
- Rocha, F. A. (1998). Introducción a la hidráulica fluvial. Perú.
- Rosas Flores, F. S., & Tejada Flores, S. P. (2020). Estimación del caudal a partir de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala aplicado en flujo a superficie libre (Canal Carapongo Bajo, Lima, Perú). *Revista Gaceta Técnica*, 22(1), 53–65.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28763.08480>
- Sosa Sarmiento, J. D. (2019). Mediciones no intrusivas en la cuenca del Chillón para soporte de la hidrometría en el Perú. *Resumen Ejecutivo, SENAMHI*.
- Solange Dussaubat, Ximena Vargas (2005) “Aforo en un cauce natural”. Proyecto MECESUP UCH 0303-Universidad de Chile: Chile.
- Tosi, F.; Rocca, M.; Aleotti, F.; Poggi, M.; Mattoccia, S.; Tauro, F.; Toth, E.; Grimaldi, S. Enabling image-based streamflow monitoring at the edge. *Remote Sens.* 2020, 12, 2047.
- Ucha, F. (2013). Definición de Caudal. Definición ABC. Obtenido de <https://www.definicionabc.com/general/caudal.php>
- Vauchel, P. (2000). Hydraccess. Recuperado a partir de <http://www.orehybam.org/index.php/esl/Software/Hydraccess>
- Vasquez, V. A. (2016). Manejo y gestión de cuencas hidrográficas. Lima - Perú: UNALAM.
- Ven Té Chow. “Hidráulica de canales abiertos”. México, D.F., 1983
- Villón, M. (2016). Hidrología Estadística (Cuarta ed.). Lima.