



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**FACULTAD DE INGENIERIA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“CARACTERIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES  
SUPERFICIALES EN EVENTOS EXTREMOS EN LA  
CONFLUENCIA DE LOS RÍOS TARQUI Y YANUNCAY  
MEDIANTE LA TÉCNICA LSPIV”**

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

**AUTOR: DAVID SAMUEL CAMBISACA GUAYACONDO**

**VÍCTOR MARCELO LEÓN PAUTA**

**DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA**

**CUENCA - ECUADOR**

**2026**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**FACULTAD DE INGENIERIA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCION**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

“CARACTERIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES SUPERFICIALES EN  
EVENTOS EXTREMOS EN LA CONFLUENCIA DE LOS RÍOS TARQUI  
Y YANUNCAY MEDIANTE LA TÉCNICA LSPIV”

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

**AUTOR: DAVID SAMUEL CAMBISACA GUAYACONDO**

**VÍCTOR MARCELO LEÓN PAUTA**

**DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA PhD.**

**CUENCA - ECUADOR**

**2026**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

**David Samuel Cambisaca Guayacondo** y **Víctor Marcelo León Pauta** portadore(a)s de las cédulas de ciudadanía N° 0106323009 y 0107191611. Declaramos ser autores de la obra: **“CARACTERIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES SUPERFICIALES EN EVENTOS EXTREMOS EN LA CONFLUENCIA DE LOS RÍOS TARQUI Y YANUNCAY MEDIANTE LA TÉCNICA LSPIV”**, sobre la cual nos hacemos responsables sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 27 de marzo de 2026



**David Samuel Cambisaca Guayacondo**

**010632300-9**



**Víctor Marcelo León Pauta**

**010719161-1**

## **CERTIFICACIÓN**

Yo ing. Santiago Aurelio Ochoa García certifico que el presente trabajo de titulación realizado por los Sres. DAVID SAMUEL CAMBISACA GUAYACONDO y VICTOR MARCELO LEON PAUTA, egresados de la UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN, fue realizado bajo mi supervisión y tutoría con el tema " CARACTERIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES SUPERFICIALES EN EVENTOS EXTREMOS EN LA CONFLUENCIA DE LOS RÍOS TARQUI Y YANUNCAY MEDIANTE LA TÉCNICA LSPIV".

---

**ING. Santiago Aurelio Ochoa García**

**PhD.**

**C.I. 010415814-2**

**Director de trabajo de Titulación**

## **DEDICATORIA VICTOR MARCELO LEON PAUTA**

Dedico el presente trabajo, fruto de años de estudio, esfuerzo y perseverancia, en primer lugar, a Dios, por ser mi guía y fortaleza a lo largo de este camino, por bendecirme con la vida, la sabiduría y la oportunidad de alcanzar esta meta, y por acompañarme en cada desafío hasta hacerlo posible.

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida, el ejemplo permanente de sacrificio, responsabilidad y amor, y la inspiración que me enseñó a no rendirme ante las adversidades. Su apoyo incondicional, confianza y valores han sido la base sobre la cual he construido este logro.

A mis hermanos, por su respaldo moral, su compañía y sus palabras de aliento en los momentos más exigentes, contribuyendo de manera significativa a mantener firme mi propósito.

A mi familia, por creer en mí incluso en los momentos de incertidumbre, por su apoyo constante y por motivarme a culminar con éxito esta importante etapa de mi vida.

Al Ing. Héctor González, por su valiosa guía, apoyo y ejemplo a lo largo de este proceso. Su disciplina, constancia y humildad constituyen un referente demostrando que, con dedicación y compromiso, es posible alcanzar metas que en un inicio parecen inalcanzables. Su influencia ha contribuido significativamente no solo a mi formación académica, sino también al fortalecimiento de mi visión profesional.

A todos ellos, mi gratitud eterna por ser parte esencial de este logro.

## **DEDICATORIA DAVID SAMUEL CAMBISACA GUAYACONDO**

Dedico este trabajo a mis padres, a quienes les debo mucho más que este logro. Por cada sacrificio realizado en silencio, por cada esfuerzo que muchas veces implicó renunciar a sus propios sueños para darme la oportunidad de construir los míos. Por sostenerme cuando el camino se tornó difícil, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por enseñarme, con su ejemplo, que la constancia, la humildad y el trabajo honesto son el verdadero camino hacia el éxito. Este logro no me pertenece solo a mí, es también suyo, porque en cada paso han estado presentes con su amor, su entrega y su infinita fe.

A mis hermanos, por caminar a mi lado a lo largo de esta etapa, por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento en los momentos de cansancio y por recordarme siempre quién soy y de dónde vengo. Su compañía ha sido un refugio y una motivación permanente, y su confianza en mí ha sido una fuerza que me impulsó a no rendirme.

A ustedes, mi familia, que han sido mi origen, mi sostén y mi razón para seguir adelante, les dedico este logro como una muestra de mi amor, gratitud y compromiso de honrar siempre el esfuerzo que hicieron por mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Católica de Cuenca y a la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción, por brindarnos la formación académica y el respaldo necesario para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

De manera especial, agradecemos al Ingeniero Santiago Aurelio Ochoa García, director de la tesis, por su guía constante, orientación profesional y apoyo durante la elaboración de esta investigación.

Finalmente, extendemos nuestra gratitud a nuestros familiares, amigos y docentes por su apoyo incondicional, comprensión y motivación permanente hicieron posible la culminación de esta etapa académica

## RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, en la ciudad de Cuenca, con el objetivo de caracterizar las velocidades superficiales y estimar el caudal durante eventos de crecida mediante la técnica no intrusiva Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV). El estudio responde a la limitada disponibilidad de información hidráulica bajo condiciones de alto caudal y a la necesidad de aplicar metodologías seguras y confiables que contribuyan a la gestión del riesgo de inundaciones.

Se realizaron mediciones experimentales en condiciones de caudales elevados mediante el procesamiento de videos captados con dron y analizados en el software RIVeR, lo que permitió obtener campos de velocidad superficial y analizar su distribución en cada sección de estudio. Los resultados evidenciaron una concentración de las mayores velocidades en el eje principal del flujo y valores menores hacia las márgenes. Como complemento, se implementó un modelo hidrodinámico bidimensional (2D), el cual mostró una alta correlación con los datos experimentales, validando la consistencia del método aplicado.

Los resultados indican que la técnica LSPIV presenta un desempeño adecuado cuando se aplica en secciones con condiciones geométricas e hidráulicas favorables, registrando diferencias promedio inferiores al 6 % respecto a los datos de referencia. Asimismo, se estimaron caudales representativos, destacándose la zona de confluencia por presentar los valores más elevados, superiores a  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que confirma la aplicabilidad del método para la caracterización hidráulica en condiciones de crecida.

*Palabras clave:* LSPIV, velocidad superficial, caudal, confluencia, hidráulica fluvial.

## ABSTRACT

This research was conducted at the confluence of the Tarqui and Yanuncay Rivers in the city of Cuenca, aiming to characterize surface velocities and estimate discharge during flood events using the non-intrusive Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) technique. The study addresses the limited availability of hydraulic information under high-flow conditions and the need to apply safe and reliable methodologies that contribute to flood risk management.

Experimental measurements were carried out under high-flow conditions by processing drone-captured videos analyzed using the RIVeR software, which enabled the acquisition of surface velocity fields and the analysis of their distribution across each study section. The results showed that the highest velocities were concentrated along the main flow axis, with lower values toward the river edges. Additionally, a two-dimensional (2D) hydrodynamic model was implemented, showing a high correlation with the experimental data, thereby validating the consistency of the method used.

The findings indicate that the LSPIV technique performs adequately when applied in sections with favorable geometric and hydraulic conditions, recording average differences of less than 6% compared to reference data. Additionally, representative discharges were estimated, with the confluence area showing the highest values, exceeding 70 m<sup>3</sup>/s, confirming the applicability of the method for hydraulic characterization under flood conditions.

*Keywords:* LSPIV; surface velocity; discharge; confluence; fluvial hydraulics

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	- 3 -
DEDICATORIA VICTOR MARCELO LEON PAUTA	- 4 -
DEDICATORIA DAVID SAMUEL CAMBISACA GUAYACONDO	- 5 -
AGRADECIMIENTOS	- 6 -
RESUMEN	- 7 -
ABSTRACT	- 8 -
ÍNDICE DE CONTENIDOS	- 9 -
LISTA DE FIGURAS	- 10 -
LISTA DE TABLAS	- 14 -
LISTA DE ANEXOS	- 15 -
<b>1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES</b>	<b>- 16 -</b>
1.1 ANTECEDENTES	- 16 -
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	- 19 -
1.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	- 20 -
1.4 JUSTIFICACIÓN	- 21 -
1.5 OBJETIVOS	- 23 -
1.5.1 <i>Objetivo general</i>	- 23 -
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i>	- 23 -
<b>2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	<b>- 24 -</b>
2.1 INTRODUCCIÓN	- 24 -
2.2 MÉTODOS EXPERIMENTALES EN HIDRÁULICA FLUVIAL	- 25 -
2.2.1 <i>Técnicas experimentales no intrusivas basadas en imágenes</i>	- 26 -
2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS PIV Y PTV	- 29 -
2.4 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA LSPIV	- 32 -
2.4.1 <i>Descripción del software RIVeR.</i>	- 34 -
<b>3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>- 35 -</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDIO	- 36 -
3.1.1 <i>Principales características del río Tarqui y Yanuncay</i>	- 37 -
3.2 PROBLEMAS EXISTENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO	- 38 -
3.3 DESCRIPCIÓN DE MATERIALES EMPLEADOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	- 40 -
3.4 RECOLECCIÓN DE DATOS	- 42 -
3.5 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA LSPIV	- 43 -
3.5.1 <i>Procesamiento de video a imagen</i>	- 44 -
3.5.2 <i>Velocimetría de imágenes en software PIVLab</i>	- 45 -
3.6 APLICACIÓN DEL SOFTWARE RIVER	- 48 -
3.6.1 <i>Orto-Rectificación de imágenes</i>	- 48 -
3.6.2 <i>Incorporación de la batimetría de la sección transversal.</i>	- 51 -
3.6.3 <i>Caudales de salida LSPIV</i>	- 51 -
3.7 CONTROL DE CALIDAD Y CONFIABILIDAD DEL PROCEDIMIENTO	- 53 -
<b>4. CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>- 54 -</b>

4.1	RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA PRIMERA CAMPAÑA:	- 54 -
4.1.1	Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui	- 54 -
4.1.2	Medición en el río Tarqui AJ Yanuncay	- 57 -
4.1.3	Medición en río Yanuncay DJ río Tarqui	- 61 -
4.1.4	Validación de resultados Primera Campaña	- 63 -
4.2	RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA SEGUNDA CAMPAÑA	- 64 -
4.2.1	Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui	- 64 -
4.2.2	Medición en el Río Tarqui AJ Río Yanuncay	- 67 -
4.2.3	Medición en el Río Yanuncay DJ Río Tarqui	- 70 -
4.2.4	Validación de resultados Segunda Campaña	- 74 -
4.3	RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA TERCERA CAMPAÑA	- 75 -
4.3.1	Medición en el Río Yanuncay AJ Río Tarqui	- 75 -
4.3.2	Medición en el Río Tarqui AJ Río Yanuncay	- 78 -
4.3.3	Medición en Río Yanuncay DJ Río Tarqui	- 80 -
4.3.4	Validación de resultados Tercera Campaña	- 83 -
4.4	RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA CUARTA CAMPAÑA	- 84 -
4.4.1	Medición en el Río Yanuncay AJ Río Tarqui	- 84 -
4.4.2	Medición en el Río Tarqui AJ Río Yanuncay	- 88 -
4.4.3	Medición en Río Yanuncay DJ Río Tarqui	- 90 -
4.4.4	Validación de resultados Cuarta Campaña	- 94 -
4.5	RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA QUINTA CAMPAÑA	- 95 -
4.5.1	Medición en el Río Yanuncay AJ Tarqui	- 95 -
4.5.2	Medición en el Río Tarqui AJ Río Yanuncay	- 97 -
4.5.3	Medición en la Río Yanuncay DJ Río Tarqui	- 100 -
4.5.4	Validación de Resultados Quinta Campaña	- 104 -
4.6	RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA SEXTA CAMPAÑA	- 104 -
4.6.1	Medición en el Río Yanuncay AJ Río Tarqui	- 104 -
4.6.2	Medición en el Río Tarqui AJ Río Yanuncay	- 107 -
4.6.1	Medición en la Río Yanuncay DJ Río Tarqui	- 110 -
4.6.2	Validación de resultados Sexta Campaña	- 113 -
4.7	DISCUSIÓN	- 114 -
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>- 116 -</b>
5.1	CONCLUSIONES	- 116 -
5.2	RECOMENDACIONES	- 117 -
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>- 119 -</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>- 122 -</b>
<b>7.</b>	<b>AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>- 124 -</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Las intensas lluvias provocaron el desbordamiento de los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay, el 15 de mayo de 2021. Ecu-911	- 19 -
Figura 2	Esquema conceptual del proceso de velocimetría por imágenes (PIV/PTV) para la estimación de campos de velocidad en flujos superficiales (Fuente; (Massó, 2018)).	- 30 -
Figura 3	Rectificación geométrica. (Fuente; (Andrade, 2015))	- 33 -
Figura 4	Diagrama de flujo del procesamiento de datos en el software RIVeR para el análisis de velocimetría por imágenes a gran escala. (Fuente; (Patalano, 2017))	- 35 -

Figura 5 Mapa de la zona de estudio (Fuente; Propia) .....	- 37 -
Figura 6 Desbordamiento del rio Yanuncay el 14 de mayo 2017 Fuente:(Fernandez de Cordova, 2021). - 40 -	- 40 -
-	-
Figura 7 Extracciones de imágenes con Software River (Fuente; Propia) .....	- 45 -
Figura 8 Secuencia de Fotogramas y procesamiento en PIVlab (Fuente; Propia) .....	- 45 -
Figura 9 Pre-Proceso PIVlab (Fuente; Propia).....	- 46 -
Figura 10 Campo vectorial promedio obtenido mediante la herramienta Calculate median en PIVlab (Fuente: Propia). .....	- 47 -
Figura 11 Ingreso de distancias reales entre puntos de control para la rectificación geométrica en el software RIVeR (Fuente: Propia) .....	- 49 -
Figura 12 Región de interés rectificada y definición de la escala espacial del píxel en el software RIVeR (Fuente: Propia). .....	- 49 -
Figura 13 Definición del tiempo de muestreo (sampling time) para la conversión de velocidades en el software RIVeR (Fuente: Propia).....	- 50 -
Figura 14 Campo vectorial de velocidades superficiales en coordenadas reales tras la rectificación geométrica en el software RIVeR (Fuente: Propia). .....	- 50 -
Figura 15 Definición de la sección transversal para la estimación del caudal mediante LSPIV en el software RIVeR (Fuente: Propia).....	- 51 -
Figura 16 Integración del perfil batimétrico y campo de velocidades para la estimación del caudal en el software RIVeR (Fuente: Propia) .....	- 52 -
Figura 17 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 55 -
Figura 18 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s .....	- 56 -
Figura 19 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 56 -
Figura 20 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 57 -
Figura 21 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 58 -
Figura 22 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s .....	- 59 -
Figura 23 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 59 -
Figura 24 Perfil de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 60 -
Figura 25 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 61 -
Figura 26 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s .....	- 62 -
Figura 27 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 62 -
Figura 28 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 63 -
Figura 29 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 65 -
Figura 30 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s.....	- 65 -
Figura 31 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 66 -
Figura 32 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 66 -
Figura 33 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 67 -
Figura 34 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s.....	- 68 -
Figura 35 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 69 -
Figura 36 Perfil de velocidades Tarqui DJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	- 69 -
Figura 37 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 71 -
Figura 38 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s. ....	- 72 -
Figura 39 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 72 -
Figura 40 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	- 73 -

Figura 41 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 75 -
Figura 42 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s.....	- 76 -
Figura 43 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 76 -
Figura 44 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 77 -
Figura 45 Batimetría en la sección Tarqui AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia).....	- 78 -
Figura 46 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s.....	- 79 -
Figura 47 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Tercera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 79 -
Figura 48 Perfil de velocidades Tarqui DJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 80 -
Figura 49 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 81 -
Figura 50 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s .....	- 81 -
Figura 51 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 82 -
Figura 52. Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia).....	- 83 -
Figura 53 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia).....	- 85 -
Figura 54 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s.....	- 86 -
Figura 55 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 86 -
Figura 56 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 87 -
Figura 57 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia).....	- 88 -
Figura 58 Sección de control (Superior Izquierda), Campo de velocidad vectorial (Superior Derecha), y Campo de velocidad promedio (Inferior) Tarqui AJ Yanuncay en m/s .....	- 89 -
Figura 59 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 89 -
Figura 60 Perfil de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 90 -
Figura 61 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 91 -
Figura 62. Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s .....	- 92 -
Figura 63 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia).....	- 92 -
Figura 64 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia).....	- 93 -
Figura 65 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia).....	- 95 -
Figura 66 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s.....	- 96 -
Figura 67 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 96 -
Figura 68 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 97 -
Figura 69 Batimetría en la sección Tarqui DJ Yanuncay (Quinta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 98 -
Figura 70 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s.....	- 98 -
Figura 71 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Quinta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 99 -
Figura 72 Perfil de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Quinta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 100 -
Figura 73 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 101 -
Figura 74 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s .....	- 102 -
Figura 75 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia).....	- 102 -
Figura 76 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 103 -
Figura 77 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 105 -
Figura 78 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s.....	- 105 -
Figura 79 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia) .....	- 106 -
Figura 80 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia).....	- 107 -

<i>Figura 81 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Sexta Campaña) (Fuente; Propia) .....</i>	<i>- 108 -</i>
<i>Figura 82 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s.....</i>	<i>- 109 -</i>
<i>Figura 83 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Sexta Campaña) (Fuente; Propia) .....</i>	<i>- 109 -</i>
<i>Figura 84 Perfil de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Sexta Campaña) (Fuente; Propia).....</i>	<i>- 110 -</i>
<i>Figura 85 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia).....</i>	<i>- 111 -</i>
<i>Figura 86 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s .....</i>	<i>- 112 -</i>
<i>Figura 87 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia) .....</i>	<i>- 112 -</i>
<i>Figura 88 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia) .....</i>	<i>- 113 -</i>

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Clasificación general de métodos experimentales en hidráulica fluvial.</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Tabla 2 Ventajas y limitaciones de la velocimetría por imágenes en ríos urbanos.</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Tabla 3 Control de calidad básico para velocimetría por imágenes en campo.</i>	<i>- 29 -</i>
<i>Tabla 4 Comparación entre PIV y PTV para su comprensión y uso como base metodológica.</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Tabla 5 Características hidrológicas y cobertura vegetal de las cuencas en estudio</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Tabla 6 Principales eventos de crecida registrados en los ríos Tarqui y Yanuncay.</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Tabla 7 Materiales e instrumentos utilizados en la investigación.</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Tabla 8 Velocidades y Caudales con LSPIV Primera Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)</i>	<i>- 57 -</i>
<i>Tabla 9 Velocidades y Caudales con LSPIV Primera Campaña Tarqui (Fuente; Propia)</i>	<i>- 60 -</i>
<i>Tabla 10 Velocidades y Caudales con LSPIV Primera Campaña Confluencia (Fuente; Propia)</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Tabla 11 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Primera Campaña.</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Tabla 12 Velocidades y Caudales con LSPIV Segunda Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Tabla 13 Velocidades y Caudales con LSPIV Segunda Campaña Tarqui (Fuente; Propia)</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Tabla 14 Velocidades y Caudales con LSPIV Segunda Campaña Confluencia (Fuente; Propia)</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Tabla 15 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Segunda Campaña</i>	<i>- 74 -</i>
<i>Tabla 16 Velocidades y Caudales con LSPIV Tercera Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Tabla 17 Velocidades y Caudales con LSPIV Tercera Campaña Tarqui (Fuente; Propia)</i>	<i>- 80 -</i>
<i>Tabla 18 Velocidades y Caudales con LSPIV Tercera Campaña Confluencia (Fuente; Propia)</i>	<i>- 83 -</i>
<i>Tabla 19 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Tercera Campaña</i>	<i>- 84 -</i>
<i>Tabla 20 Velocidades y Caudales con LSPIV Cuarta Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)</i>	<i>- 87 -</i>
<i>Tabla 21 Velocidades y Caudales con LSPIV Cuarta Campaña Tarqui (Fuente; Propia)</i>	<i>- 90 -</i>
<i>Tabla 22 Velocidades y Caudales con LSPIV Cuarta Campaña Confluencia (Fuente; Propia)</i>	<i>- 93 -</i>
<i>Tabla 23 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Cuarta Campaña</i>	<i>- 94 -</i>
<i>Tabla 24 Velocidades y Caudales con LSPIV Quinta Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)</i>	<i>- 97 -</i>
<i>Tabla 25 Velocidades y Caudales con LSPIV Quinta Campaña Tarqui (Fuente; Propia)</i>	<i>- 100 -</i>
<i>Tabla 26 Velocidades y Caudales con LSPIV Quinta Campaña Confluencia (Fuente; Propia)</i>	<i>- 103 -</i>
<i>Tabla 27 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Quinta Campaña</i>	<i>- 104 -</i>
<i>Tabla 28 Velocidades y Caudales con LSPIV Sexta Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)</i>	<i>- 107 -</i>
<i>Tabla 29 Velocidades y Caudales con LSPIV Sexta Campaña Tarqui (Fuente; Propia)</i>	<i>- 110 -</i>
<i>Tabla 30 Velocidades y Caudales con LSPIV Sexta Campaña Confluencia (Fuente; Propia)</i>	<i>- 113 -</i>
<i>Tabla 31 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Sexta Campaña</i>	<i>- 114 -</i>
<i>Tabla 32 Resultados en base a las variaciones con respecto a ETAPA EP (Fuente; Propia)</i>	<i>- 114 -</i>

## LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1: Levantamiento topográfico de los Puntos de control CPs y perfiles de los cauces (Fuente; Propia). - 122 -*
- Anexo 2: Punto de control CPs y distancias de rectificación (Fuente; Propia) \_\_\_\_\_ - 122 -*
- Anexo 3: Vuelos de dron y recolección de datos (Fuente; Propia) \_\_\_\_\_ - 123 -*
- Anexo 4: Registro de las mayores crecidas observadas (Fuente; Propia) \_\_\_\_\_ - 123 -*

# **1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES**

## **1.1 Antecedentes**

Desde la década de 1980, diversos investigadores han trabajado en la adaptación de la técnica PIV (Particle Image Velocimetry), originalmente desarrollada para estudios de laboratorio, hacia aplicaciones en entornos de campo. Esta evolución ha permitido caracterizar flujos de mayor escala que los observados en laboratorio, dando lugar a la técnica conocida como velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala “LSPIV” (Patalano et al., 2017). Esta metodología ha revolucionado la medición de flujos naturales al posibilitar la estimación de velocidades superficiales sin necesidad de contacto directo con el agua (no intrusivas), utilizando el análisis de secuencias de imágenes, lo cual ha permitido ampliar el monitoreo hidrométrico en escenarios donde el acceso al cauce es complejo y el riesgo operativo aumenta, particularmente durante crecidas y avenidas súbitas (Patalano, 2017).

En la actualidad, su uso se reporta con frecuencia en estudios de seguimiento hidrológico y validación de modelos, ya que ofrece resultados consistentes cuando se controlan parámetros como la geometría de referencia, la resolución del video, la iluminación y la densidad de trazadores, elementos que condicionan la calidad del cálculo y que actualmente se consideran parte del estándar de buenas prácticas para aplicaciones en campo (Dal Sasso, 2020). En este contexto, el desarrollo del software RIVeR (Rectification of Image Velocity Results) ha optimizado el tratamiento de imágenes y la obtención de campos de velocidad con alta resolución (Botelli et al., 2020).

La literatura reciente documenta múltiples aplicaciones de LSPIV orientadas a la gestión del riesgo de inundaciones y a la evaluación de caudales en eventos de alta energía. Esta técnica resulta especialmente útil cuando los métodos de aforo tradicionales se vuelven

inseguros o inviables, ya que los instrumentos mecánicos o acústicos requieren proximidad al flujo y condiciones de estabilidad que no suelen mantenerse durante una avenida. Diversos estudios han validado su eficacia al compararla con técnicas acústicas como el ADCP, demostrando una alta correlación en los valores de velocidad superficial (Botelli et al., 2020; Cabezudo Tejeda, 2017).

En Taiwan, aplicaron la técnica LSPIV en la cuenca alta del embalse de Shimen, al norte de Taiwán, donde evaluaron la vulnerabilidad urbana ante inundaciones repentinas. Los resultados demostraron que la técnica permite realizar estimaciones confiables de velocidades superficiales y descargas fluviales durante eventos extremos como tifones, mejorando la precisión de los modelos hidrodinámicos utilizados para la gestión del riesgo (Huang et al., 2018)

De manera similar, el estudio de (Guillén et al., 2017) documentó la aplicación del LSPIV durante una inundación repentina ocurrida el 29 de noviembre de 2012 en la ciudad de Asunción, Paraguay. El análisis de secuencias de video permitió caracterizar las altas velocidades del flujo que ocasionaron el arrastre de personas y vehículos. Los resultados validaron criterios de vulnerabilidad existentes y demostraron la efectividad de la técnica para analizar eventos hidrológicos extremos, consolidando su aplicación en contextos urbanos de Sudamérica.

En el ámbito local, la ciudad de Cuenca presenta un sistema fluvial urbano compuesto por los ríos Tomebamba, Yanuncay, Tarqui y Machángara, los cuales estructuran la dinámica ambiental y territorial, aunque durante la temporada lluviosa se registran incrementos significativos de caudal que derivan en crecidas e inundaciones con impactos sobre infraestructura, ecosistemas ribereños y seguridad de la población, situación que se intensifica en sectores críticos como la confluencia Tarqui Yanuncay, reconocida por su

vulnerabilidad hidrológica (Ochoa-García et al., 2025). En este contexto además el trabajo de (Aldana Quizhpi & Tsenkush Shakai, 2024) representa un avance significativo a nivel nacional, al aplicar la técnica en la ciudad de Cuenca durante el período de estiaje, lo que confirmando su viabilidad en condiciones andinas y estableciendo un precedente para futuras investigaciones orientadas al monitoreo hidrológico y la gestión del riesgo de inundaciones en el país.

La evidencia científica reciente sobre los ríos de la zona muestra que la velocimetría por imágenes constituye una vía práctica para caracterizar el flujo cuando las condiciones del cauce limitan el uso de instrumentación intrusiva, aportando datos para análisis hidráulicos y para la verificación de modelos en escenarios representativos del territorio andino.

A partir de estos antecedentes, la investigación se orientó a caracterizar las velocidades superficiales durante eventos extremos en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay mediante la aplicación de LSPIV con apoyo del software RIVeR, con el fin de describir el comportamiento hidrodinámico del flujo y generar información útil para la gestión del riesgo de inundaciones en el área de estudio.

El trabajo integró la revisión del comportamiento hidrológico histórico, la captura de secuencias de video en condiciones de crecida y su procesamiento digital para obtener campos de velocidad superficial, complementándose con productos gráficos y técnicos que sintetizan los resultados y facilitan su uso en análisis posteriores de calibración y validación de modelos hidrodinámicos (Jolley, 2021)

## 1.2 Formulación del problema

La ciudad de Cuenca, ubicada en el sur del Ecuador, está atravesada por varios ríos urbanos, entre los cuales destacan el Tarqui y el Yanuncay. Ambos cuerpos hídricos presentan un historial recurrente de crecidas y desbordamientos, especialmente durante la temporada de lluvias. Estas situaciones generan afectaciones significativas en la infraestructura, el entorno urbano y la seguridad de la población, evidenciando la vulnerabilidad de la ciudad frente a eventos hidrometeorológicos extremos (Fernandez de Cordova, 2021). En los últimos años, se ha observado un incremento en la frecuencia e intensidad de estos desbordamientos, situación que resalta la necesidad de un monitoreo hidrológico más preciso y oportuno (Figura 1).



*Figura 1 Las intensas lluvias provocaron el desbordamiento de los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay, el 15 de mayo de 2021. Ecu-911*

La medición precisa de caudales durante eventos extremos representa un desafío técnico significativo en la hidrometría moderna. La magnitud, inestabilidad y peligrosidad de estos eventos dificultan la aplicación de métodos convencionales. Las altas velocidades del flujo, la intensa turbulencia, las aceleraciones súbitas y el arrastre de materiales obstaculizan el uso de métodos tradicionales como molinetes o perfiladores acústicos de corriente (ADCP), incrementando el riesgo para el personal y los equipos, ya que estos

métodos requieren exposición directa al agua (Massó et al., 2024). Estas condiciones generan vacíos en la obtención de datos confiables, limitando la calibración de modelos hidrológicos y afectando la planificación de estrategias de gestión y mitigación de riesgos asociados a crecidas e inundaciones.

Ante estas limitaciones, surge la necesidad de explorar técnicas innovadoras. La técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) se presenta como una alternativa experimental no intrusiva, segura y eficiente para la medición de velocidades superficiales en flujos naturales (Tauro et al., 2017b). Este método se basa en el análisis de secuencias de video captadas por cámaras fijas o sistemas aéreos no tripulados (drones), estimando el campo de velocidades a partir del desplazamiento de partículas o trazadores naturales en la superficie del flujo. Su aplicación en ríos de montaña permite obtener mediciones continuas sin ingresar al cauce, reduciendo el riesgo operativo y mejorando la resolución espacial y temporal de los datos hidrodinámicos (Botelli et al., 2020)

Adicionalmente, el uso de software especializado como RIVeR, diseñado para procesar la caracterización superficial del agua a gran escala, ya sea calculando campos de velocidad o determinando trayectorias de trazadores flotantes, aumenta la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos, proporcionando una herramienta robusta para el análisis y control de crecidas en cauces naturales (Massó, 2018)

### **1.3 Delimitación del problema**

La presente investigación se delimita a la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, en la ciudad de Cuenca, donde se aplicará la técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) para estimar velocidades superficiales y caudales a partir del análisis de videos del flujo. El procesamiento se realizará mediante el software RIVeR, el cual utiliza los principios

de la velocimetría de imágenes a gran escala para obtener el campo de velocidades superficiales del flujo (Patalano et al., 2017)

El estudio se limita al análisis de eventos hidrológicos específicos registrados durante las campañas de medición y a una sección definida mediante levantamiento batimétrico previo. No se incluye el monitoreo continuo ni la simulación hidrodinámica del cauce. La información obtenida permitirá caracterizar el comportamiento superficial del flujo en condiciones de caudal variable y aportar datos técnicos para el análisis hidráulico y la gestión de zonas ribereñas (Patalano, 2017).

#### **1.4 Justificación**

La técnica LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry) se presenta como una metodología moderna e innovadora para la caracterización de flujos, con un potencial significativo para la gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres naturales. A pesar de los avances tecnológicos, los métodos tradicionales de medición no han evolucionado lo suficiente para facilitar la obtención de datos precisos de velocidades superficiales y caudales, especialmente en condiciones adversas como crecidas y estiajes (Rosas Flores & Tejeda Flores, 2020)

La naturaleza remota del LSPIV ofrece ventajas sustanciales: elimina el riesgo para los operadores, permite la adquisición de datos en tiempo real y cubre un área espacialmente mayor en comparación con las mediciones puntuales convencionales. La integración de drones con técnicas avanzadas de procesamiento digital de imágenes optimiza la adquisición, corrección y tratamiento de la información, lo que favorece una caracterización precisa del comportamiento de flujos extremos y la validación de modelos numéricos.

La implementación de la técnica LSPIV en los ríos Tarqui y Yanuncay, en la ciudad de Cuenca, puede proporcionar información clave sobre el comportamiento de los flujos extremos que afectan periódicamente a la zona. Esta herramienta contribuiría a una mejor comprensión de los procesos hidrológicos y a la reducción de la incertidumbre en los modelos de predicción y gestión de riesgos. Cabe destacar que en esta área ya se han realizado estudios de caudales durante la época de estiaje, los cuales han generado datos fundamentales para caracterizar las velocidades de flujo en los cauces (Aldana Quizhpi & Tsenkush Shakai, 2024) Por ello, la ejecución de monitoreos durante la temporada de lluvias resulta esencial para obtener datos empíricos valiosos que fortalezcan futuras investigaciones, validen modelos hidrodinámicos y mejoren las estrategias locales de monitoreo fluvial.

Desde una perspectiva económica y operativa, la técnica LSPIV se presenta como una solución rentable. Reduce los costos de operación, mantenimiento y riesgo en la toma de datos, al eliminar la necesidad de instalar sensores físicos dentro del cauce. Además, mejora las condiciones seguridad en la toma de datos, al evitar que el personal deba ingresar al río o realizar mediciones directas durante eventos de crecida, situaciones que representa un riesgo significativo (Massó, 2018). Su implementación mediante drones y software de libre acceso, como RIVeR, permite realizar mediciones de alta precisión con equipos de bajo costo y mínima intervención, optimizando los recursos humanos y financieros (Patalano et al., 2017). Los resultados obtenidos podrían servir como insumo técnico valioso para instituciones locales y municipales en la planificación de infraestructuras hidráulicas, el diseño de obras de control y la gestión eficiente del riesgo en zonas vulnerables.

Desde una perspectiva académica, este estudio contribuye al fortalecimiento de la ingeniería civil y la hidrología experimental, al aplicar una técnica de medición avanzada que ha sido poco explorada en el contexto ecuatoriano. Actualmente, la mayoría de las

investigaciones sobre LSPIV se han desarrollado en Europa y Sudamérica (Argentina, Italia, Hungría), por lo que su implementación en los ríos Tarqui y Yanuncay representa una aportación científica relevante y contextualizada (Fleit & Baranya, 2022).

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

Caracterizar las velocidades superficiales durante eventos extremos en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, mediante la aplicación de la técnica LSPIV, con el propósito de analizar el comportamiento hidrodinámico y aportar información que contribuya a la gestión del riesgo de inundaciones en la zona de estudio.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

Analizar el comportamiento hidrológico histórico de los ríos Tarqui y Yanuncay mediante la recopilación y procesamiento estadístico de los registros de caudales disponibles, con el propósito de identificar los patrones de variabilidad y determinar los caudales máximos históricos.

Implementar la técnica LSPIV junto con el software RIVeR, mediante la captura de secuencias de video y su procesamiento digital para la obtención de campos de velocidad superficial en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay en caudales de crecida.

Elaborar mapas de velocidad, gráficos comparativos y un resumen técnico que sintetice los hallazgos más relevantes en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay a partir del análisis espacial de los datos

## 2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Introducción

El análisis de la dinámica del flujo en ríos urbanos es fundamental para comprender los procesos hidráulicos asociados a eventos de crecida e inundación. En estos escenarios, los métodos convencionales de aforo y medición presentan limitaciones debido a las dificultades de acceso, la elevada turbulencia, el arrastre de sedimentos y el riesgo para el personal técnico (Fernández de Córdoba, 2021).

En este contexto, la técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) se ha consolidado como un método no intrusivo para estimar velocidades superficiales en cauces naturales. Su fundamento se basa en el análisis de secuencias de imágenes o videos de la superficie del agua, mediante el seguimiento de partículas o patrones visibles generados por la turbulencia. A partir de su desplazamiento entre cuadros consecutivos es posible estimar campos de velocidad superficial que permiten caracterizar el comportamiento hidráulico del flujo (Botelli et al., 2020).

La implementación del método suele apoyarse en sistemas aéreos no tripulados para la captura de imágenes y en herramientas computacionales para su procesamiento, como el software RIVeR, que permite realizar la rectificación geométrica de las imágenes y el cálculo de velocidades superficiales en superficies libres (Patalano et al., 2017). En el presente estudio, esta técnica se aplicará en los ríos Tarqui, Yanuncay y en la zona de confluencia de ambos, con el objetivo de determinar las velocidades superficiales y estimar el caudal, aportando información relevante para el monitoreo hidrológico y la gestión de los recursos hídricos en la ciudad de Cuenca.

## **2.2 Métodos experimentales en hidráulica fluvial**

La hidráulica fluvial utiliza métodos experimentales son esenciales para caracterizar el comportamiento del flujo en ríos naturales, partir de la medición de variables como velocidad, nivel y caudal. Estos datos permiten analizar la dinámica del flujo, evaluar procesos de transporte de sedimentos y sustentar la calibración y validación de modelos hidrodinámicos, especialmente en sistemas con alta variabilidad espacio temporal (Muste et al., 2008).

Los métodos de laboratorio se fundamentan en el desarrollo los modelos físicos a escala (por ejemplo, en flumes o canales de ensayo) permiten reproducir condiciones controladas para observar procesos hidráulicos y morfológicos (distribución de velocidades, erosión, sedimentación) y evaluar escenarios difíciles de instrumentar en el medio natural; además, facilitan la instrumentación y repetibilidad de ensayos (Cabezudo Tejeda, 2017)

En campo, la medición se realiza directamente en el cauce, incluyendo aforos y observaciones de geometría, sedimentos y niveles. Tradicionalmente se emplean métodos intrusivos como molinetes, flotadores y dispositivos acústicos como ADCP, los cuales permiten mediciones puntuales o perfiles de velocidad para estimar caudales; sin embargo, en crecidas pueden aparecer restricciones por turbulencia, arrastre de material, accesibilidad y seguridad (Tabla 1). Para mejorar la representatividad temporal, el monitoreo continuo mediante estaciones hidrométricas y sensores de nivel es una práctica central en los servicios hidrológicos(Cabezudo Tejeda, 2017)

Los métodos experimentales se clasifican en intrusivos y no intrusivos según su grado de contacto con el flujo, donde los intrusivos requieren instrumentos dentro del cauce y suelen producir mediciones puntuales o por verticales, mientras que los no intrusivos obtienen información desde ubicaciones seguras mediante señales visuales o medición

remota, reduciendo riesgos y evitando intervenir el sistema. La recurrencia de emergencias por inundaciones refuerza la necesidad de fortalecer métodos no intrusivos para obtener datos durante eventos de alta peligrosidad, debido a que permiten registrar información en el momento de mayor interés sin comprometer la seguridad del personal ni la integridad del equipo (Aldana Quizhpi & Tsenkush Shakai, 2024; Patalano, 2017)

*Tabla 1 Clasificación general de métodos experimentales en hidráulica fluvial.*

<b>Tipo de método</b>	<b>Características principales</b>	<b>Limitaciones en eventos extremos</b>	<b>Ejemplos en ríos</b>
<b>Intrusivos</b>	Requieren contacto con el flujo, medición puntual o por secciones dentro del cauce	Riesgo elevado para el personal, imposibilidad de operar por turbulencia, escombros y cambios rápidos del nivel	Molinete, aforo con flotadores, ADCP
<b>No intrusivos</b>	Se basan en observación remota sin ingresar al agua, usan señales visuales o medición a distancia	Dependencia de condiciones de visibilidad, necesidad de calibración y rectificación geométrica	LSPIV, LSPTV, registros por video desde puente o dron

**Fuente:** Elaboración propia a partir de (Aldana Quizhpi & Tsenkush Shakai, 2024; Cabezudo Tejeda, 2017; Patalano, 2017; Tauro et al., 2017).

### **2.2.1 Técnicas experimentales no intrusivas basadas en imágenes**

En las últimas décadas, el desarrollo de tecnologías ópticas y de procesamiento digital de imágenes ha permitido la implementación de métodos no intrusivos para la medición de velocidades en flujos hidráulicos. Estas técnicas se basan en el análisis de secuencias de imágenes o videos de la superficie del agua, a partir de las cuales se puede estimar el desplazamiento de partículas o patrones visibles generados por la turbulencia del flujo. A diferencia de los métodos tradicionales de medición, estas metodologías permiten obtener información hidráulica sin contacto directo con el fluido, reduciendo los riesgos asociados al trabajo de campo y ampliando la cobertura espacial de las mediciones (Muste et al., 2008; Patalano, 2017).

El principio de funcionamiento de la velocimetría por imágenes consiste en analizar la correlación entre imágenes consecutivas separadas por un intervalo de tiempo conocido. A partir del desplazamiento de partículas o estructuras visibles en la superficie del flujo, es posible estimar vectores de velocidad distribuidos espacialmente sobre el área de estudio. Este enfoque, desarrollado inicialmente en estudios de mecánica de fluidos en laboratorio, ha evolucionado progresivamente hacia su aplicación en ambientes naturales, como ríos y canales abiertos (Adrián, 1991).

Entre las principales metodologías basadas en análisis de imágenes se destacan Particle Image Velocimetry (PIV), Particle Tracking Velocimetry (PTV) y Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV). Estas técnicas han demostrado ser herramientas eficaces para la medición de velocidades en flujos superficiales, ya que permiten obtener campos de velocidad con alta resolución espacial y analizar la distribución del flujo en diferentes sectores del cauce (Adrián, 1991).

La aplicación de estas metodologías en entornos fluviales ha permitido mejorar la comprensión de la dinámica del flujo y superar algunas limitaciones de los métodos convencionales de medición. Asimismo, la integración con cámaras de alta resolución y plataformas aéreas, como drones, ha ampliado significativamente su potencial para el monitoreo hidráulico en ríos naturales, especialmente en condiciones donde el acceso al cauce resulta limitado o peligroso (Massó, 2018; Tauro et al., 2017).

*Tabla 2 Ventajas y limitaciones de la velocimetría por imágenes en ríos urbanos.*

<b>Aspecto</b>	<b>Ventajas principales</b>	<b>Limitaciones principales</b>	<b>Implicación para el estudio</b>
<b>Seguridad operativa</b>	No requiere ingreso al cauce	Dependencia de un punto de captura seguro y estable	Permite realizar mediciones durante eventos de crecida

	ni contacto con el flujo		reduciendo el riesgo para el personal
<b>Cobertura espacial</b>	Genera campos de velocidad distribuidos en el área analizada	Requiere buena visibilidad de la superficie del agua	Facilita el análisis comparativo entre el eje del cauce, márgenes y zonas de mezcla
<b>Representatividad del flujo</b>	Minimiza la perturbación del flujo al no introducir instrumentos	Los patrones superficiales pueden verse afectados por viento o iluminación	Se requiere aplicar criterios de filtrado y validación de vectores
<b>Operatividad</b>	Permite registro rápido y procesamiento posterior de los datos	Requiere procesamiento digital y parametrización adecuada	Favorece la reproducibilidad del análisis cuando el procedimiento se documenta correctamente

**Fuente:** Elaboración propia a partir (Adrián, 1991; Massó, 2018)

Con base en estas características, la (Tabla 2) resume algunas de las principales ventajas y limitaciones asociadas a la aplicación de técnicas de velocimetría por imágenes en ríos urbanos, considerando aspectos relacionados con la seguridad, la cobertura espacial del análisis y las condiciones necesarias para garantizar resultados confiables.

Por otra parte, la obtención de mediciones precisas mediante estas técnicas requiere considerar diversos factores asociados a la calidad del registro visual y al procesamiento de las imágenes. Elementos como la estabilidad de la cámara, las condiciones de iluminación, la presencia de patrones superficiales rastreables y la correcta definición de puntos de referencia influyen directamente en la confiabilidad del campo de velocidades obtenido. En este sentido, la (Tabla 3) presenta un conjunto de criterios básicos de control de calidad

aplicados en estudios de velocimetría por imágenes en campo, los cuales contribuyen a mejorar la consistencia y precisión de los resultados (Massó, 2018).

*Tabla 3 Control de calidad básico para velocimetría por imágenes en campo.*

<b>Componente del registro</b>	<b>Parámetro verificado</b>	<b>Problema frecuente en campo</b>	<b>Medida de control aplicada</b>	<b>Efecto en el resultado</b>
<b>Estabilidad de la cámara</b>	Ausencia de movimiento aparente en la imagen	Vibraciones por viento o soporte inestable	Estabilización del video o descarte de segmentos afectados	Reduce la generación de vectores erráticos
<b>Iluminación</b>	Contraste adecuado de los patrones superficiales	Brillos o reflejos en la lámina de agua	Aplicación de máscaras y delimitación de región de interés	Mejora la coherencia del campo de velocidades
<b>Textura superficial</b>	Presencia de patrones rastreables	Superficie lisa con baja señal visual	Ajuste del intervalo temporal y del tamaño de las ventanas de correlación	Incrementa la confiabilidad del cálculo de desplazamientos
<b>Geometría de referencia</b>	Distribución adecuada de puntos de control	Puntos insuficientes o mal distribuidos	Incremento de puntos de control para la rectificación	Mejora la escala espacial y la precisión geométrica

**Fuente:** Elaboración propia a partir de (Massó, 2018; Massó et al., 2024; Patalano, 2017).

### **2.3 Descripción de las técnicas PIV y PTV**

Las técnicas Particle Image Velocimetry (PIV) y Particle Tracking Velocimetry (PTV) constituyen métodos ópticos ampliamente utilizados para la medición de velocidades en flujos de fluidos mediante el análisis de imágenes digitales. Ambas metodologías se basan en la identificación y seguimiento de partículas trazadoras presentes en el flujo, las cuales permiten estimar el desplazamiento del fluido entre imágenes consecutivas registradas por una cámara. A partir de este desplazamiento y del intervalo de tiempo entre cuadros, es

posible calcular vectores de velocidad que describen el comportamiento del flujo en el área analizada (Adrian, 1991).

El procedimiento general utilizado en estas técnicas se basa en la captura de imágenes del flujo, su procesamiento digital y la estimación del desplazamiento de partículas entre cuadros consecutivos. La (Figura 2) muestra de manera conceptual las etapas principales del proceso de velocimetría por imágenes.

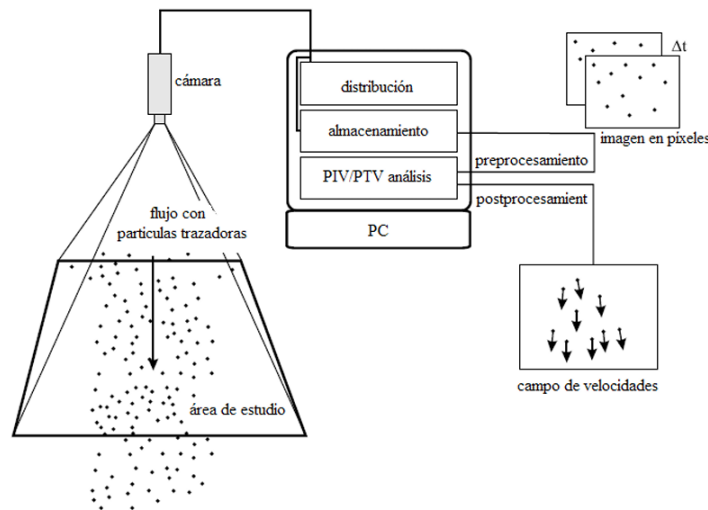


Figura 2 Esquema conceptual del proceso de velocimetría por imágenes (PIV/PTV) para la estimación de campos de velocidad en flujos superficiales (Fuente; (Massó, 2018)).

La técnica PIV se fundamenta en el análisis de correlación entre pequeñas regiones de imágenes consecutivas, denominadas ventanas de interrogación. Mediante este procedimiento se determina el desplazamiento promedio de las partículas dentro de cada ventana, lo que permite obtener un campo de velocidades distribuido espacialmente en el área de estudio. Debido a esta característica, el método PIV ha sido ampliamente utilizado en estudios experimentales de mecánica de fluidos, especialmente en condiciones de laboratorio, donde es posible controlar las condiciones de iluminación y la distribución de partículas trazadoras (Adrián, 1991; Andrade, 2015).

Por su parte, la técnica PTV se basa en el seguimiento individual de partículas trazadoras a lo largo de una secuencia de imágenes. A diferencia del método PIV, que calcula desplazamientos promedio dentro de regiones definidas, el PTV permite determinar trayectorias específicas de partículas en el flujo, lo que resulta útil para analizar el movimiento detallado de estructuras del flujo o partículas individuales (Adrián, 1991; Andrade, 2015)

Con el fin de facilitar la comprensión de las diferencias entre ambas metodologías, la (Tabla 4) presenta una comparación de sus principales características, enfoques de análisis y limitaciones.

*Tabla 4 Comparación entre PIV y PTV para su comprensión y uso como base metodológica.*

<b>Característica</b>	<b>PIV</b>	<b>PTV</b>
<b>Enfoque del análisis</b>	Promedio del desplazamiento dentro de ventanas	Seguimiento de partículas individuales
<b>Requisito de trazadores</b>	Densidad media a alta	Densidad baja a media
<b>Tipo de resultado</b>	Campo de velocidades por correlación	Trayectorias y velocidades por partícula
<b>Fortalezas</b>	Campo estable en condiciones controladas	Útil cuando hay pocos trazadores
<b>Límite común en campo</b>	Sensible a iluminación y escala	Sensible a pérdida de partículas y oclusiones

**Fuente:** Elaboración propia a partir de (Adrián, 1991; Andrade, 2015; Patalano, 2017) .

La aplicación de técnicas de velocimetría por imágenes depende de diversas variantes relacionados con las características del flujo, las propiedades de las partículas trazadoras y las condiciones de captura de las imágenes. Entre variantes más relevantes se encuentran una siembra suficiente del flujo de interés con partículas trazadoras que se mueven con el flujo sin alterar el flujo en sí, imágenes sucesivas de la escena de interés y una distancia de escala

de referencia dentro de la escena de interés y conocimiento del tiempo entre imágenes sucesivas(Lewis & Rhoads, 2018).

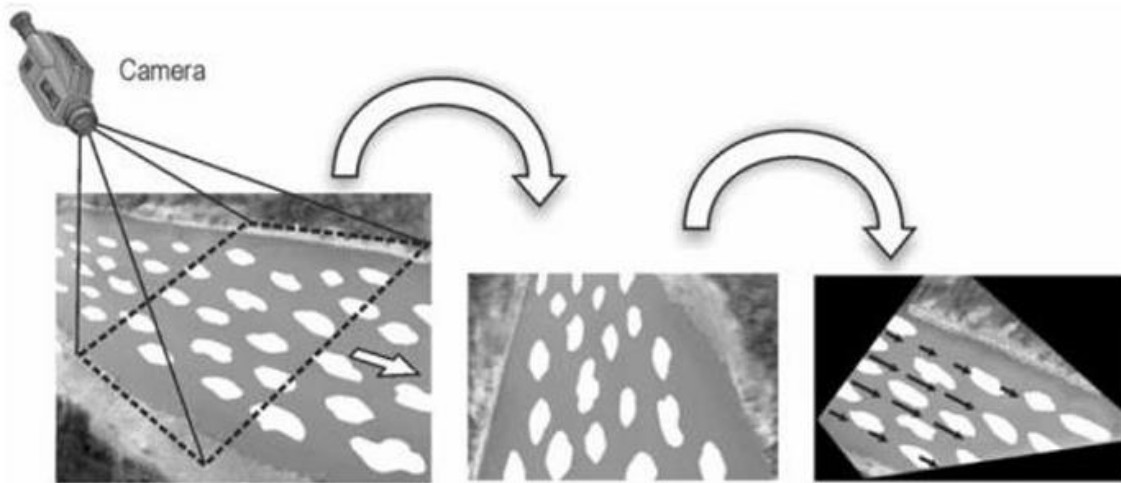
En los últimos años se han desarrollado diversas herramientas computacionales para el procesamiento de datos obtenidos mediante velocimetría por imágenes (PIV). Entre ellas destaca el software PIVlab, el cual implementa algoritmos de análisis basados en correlación para estimar el desplazamiento de partículas trazadoras entre imágenes consecutivas. El procesamiento se realiza mediante una serie de etapas que incluyen la definición de la región de interés, el preprocesamiento de las imágenes, la detección de partículas y la correspondencia temporal entre cuadros, lo que permite calcular los vectores de velocidad del flujo en el área analizada (Patalano, 2017; Thielicke & Stamhuis, 2014).

Sobre la base de los principios descritos en las técnicas PIV y PTV, se han desarrollado metodologías adaptadas para el análisis de flujos en ríos naturales a gran escala. Entre estas destaca la técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), que permite estimar velocidades superficiales en ambientes fluviales mediante el análisis de imágenes capturadas desde plataformas elevadas o aéreas. Esta técnica será descrita en detalle en la siguiente sección.

#### **2.4 Descripción de la técnica LSPIV**

La técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) constituye una adaptación del método Particle Image Velocimetry (PIV) para su aplicación en ríos y canales abiertos. Este enfoque mantiene el principio de correlación entre imágenes consecutivas para estimar el desplazamiento de patrones visibles en la superficie del agua, pero incorpora procesos adicionales como la rectificación geométrica, necesarios cuando las imágenes son capturadas desde puntos elevados como puentes, riberas o plataformas aéreas. Mediante este procedimiento se transforma la imagen original a un plano de referencia donde las distancias

pueden interpretarse en unidades reales, lo que permite corregir los efectos de perspectiva y garantizar la correcta estimación de las velocidades superficiales (Tauro et al., 2017).



*Figura 3 Rectificación geométrica. (Fuente, (Andrade, 2015))*

El método se basa en el seguimiento del desplazamiento de patrones visibles presentes en la superficie del flujo, tales como espuma, hojas, residuos flotantes o estructuras generadas por la turbulencia (Figura 3). A partir de secuencias de imágenes registradas por una cámara, los algoritmos de correlación permiten estimar el desplazamiento de estos patrones dentro de ventanas de análisis distribuidas sobre el área de estudio. Posteriormente, utilizando el intervalo de tiempo entre cuadros consecutivos, se calculan los vectores de velocidad superficial que describen la distribución espacial del flujo (Muste et al., 2008).

En los últimos años, el desarrollo de sistemas aéreos no tripulados (UAV) y el avance en el procesamiento digital de imágenes han ampliado significativamente las posibilidades de aplicación del método LSPIV en estudios hidráulicos. Estas tecnologías permiten capturar imágenes de alta resolución en diferentes secciones del río, facilitando el análisis del comportamiento del flujo en áreas extensas y en condiciones donde el acceso directo al cauce resulta limitado o peligroso. Asimismo, el uso de herramientas computacionales

especializadas, como el software RIVeR, ha contribuido a optimizar el procesamiento de las imágenes y la obtención de campos de velocidad superficial de manera más eficiente (Patalano et al., 2017).

#### **2.4.1 Descripción del software RIVeR.**

Desde el año 2013, RIVeR se desarrolla como una aplicación especializada creada en el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Este software fue diseñado con el objetivo de facilitar la caracterización experimental de flujos de agua a gran escala en canales artificiales, ríos y modelos físicos hidráulicos.

La herramienta permite analizar el comportamiento del flujo mediante la estimación de caudales, la determinación de velocidades superficiales y el seguimiento de trayectorias del flujo. De esta manera, contribuye al estudio de la dinámica hidráulica en sistemas fluviales a partir del procesamiento de imágenes capturadas en campo.

RIVeR fue desarrollado como una extensión de las herramientas de análisis PIVlab y PTVlab, incorporando funcionalidades orientadas al análisis de flujos en ambientes naturales y a gran escala. Esto permite realizar estudios experimentales más completos mediante técnicas de velocimetría por imágenes aplicadas en ríos y canales abiertos (Patalano, García & Rodríguez, 2017).

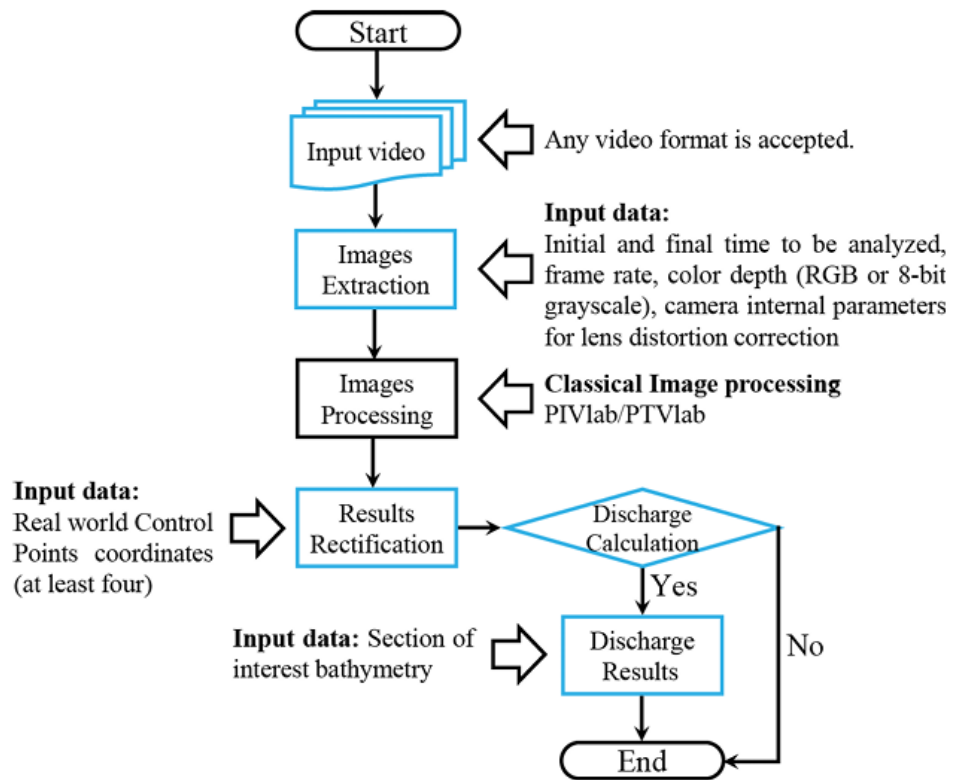


Figura 4 Diagrama de flujo del procesamiento de datos en el software RIVeR para el análisis de velocimetría por imágenes a gran escala. (Fuente; (Patalano, 2017))

La (Figura 4) muestra el flujo general de procesamiento implementado en el software RIVeR. El procedimiento inicia con la carga del video del flujo y la extracción de imágenes que serán analizadas. Posteriormente se realiza el procesamiento de las imágenes mediante técnicas de análisis PIV/PTV, seguido de la rectificación geométrica utilizando puntos de control en coordenadas reales. Finalmente, el sistema permite obtener el campo de velocidades superficial y, cuando se dispone de información batimétrica de la sección analizada, calcular el caudal del flujo.

### 3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

La metodología aplicada en el presente trabajo fue de carácter teórico y experimental, con el fin de cumplir los objetivos planteados. El estudio comprendió varias etapas, que

incluyeron la recolección de datos en campo, la medición de parámetros hidráulicos y el procesamiento de la información en oficina para su posterior análisis.

### **3.1 Área de estudio**

La zona de estudio se ubica en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, específicamente en el sector comprendido entre las avenidas 24 de Mayo y 27 de Febrero. El área abarca la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, en las inmediaciones del Parque Botánico de Cuenca y del puente de la Universidad del Azuay (UDA). En este sector se establecieron tres puntos de control, distribuidos estratégicamente a lo largo del cauce, con el propósito de registrar información representativa de la velocidad superficial durante los eventos de medición: el primero en el río Yanuncay, en las inmediaciones de la Estación de Bomberos N.º 3; el segundo en el río Tarqui, a la altura del redondel de la avenida Solano; y el tercero en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, próximo al puente de la Universidad del Azuay (UDA).

A continuación, se presenta el mapa de ubicación de los puntos seleccionados (Figura 5):

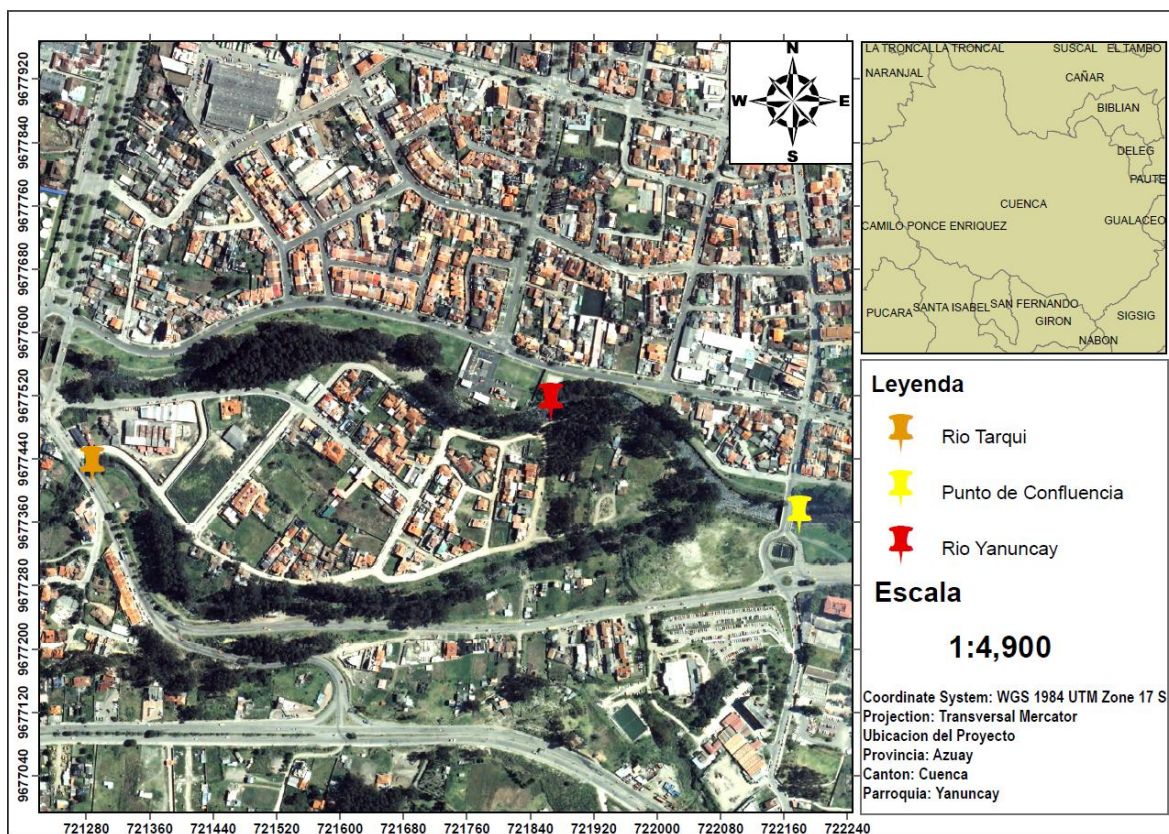


Figura 5 Mapa de la zona de estudio (Fuente; Propia)

### 3.1.1 Principales características del río Tarqui y Yanuncay

El análisis de las características hidrológicas y de cobertura vegetal de las cuencas de los ríos Tarqui y Yanuncay es fundamental para comprender su influencia en el comportamiento hidráulico del flujo en la zona de confluencia. Estos factores condicionan los procesos de escorrentía, infiltración y respuesta de la cuenca frente a eventos de precipitación.

En la (Tabla 5) se presentan los principales parámetros morfométricos, hidrológicos y de cobertura vegetal de las cuencas en estudio.

Tabla 5 Características hidrológicas y cobertura vegetal de las cuencas en estudio

Parámetro	Río Tarqui	Río Yanuncay
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	476.92	413.90

<b>Caudal pico más alto registrado (m<sup>3</sup>/s)</b>	80.304	197.74
<b>Caudal promedio de la serie (m<sup>3</sup>/s)</b>	3.21	7.75
<b>Pendiente promedio (%)</b>	2.2	2.5
<b>Elevación a la salida de la cuenca (msnm)</b>	2520	2560
<b>Elevación máxima de la cuenca (msnm)</b>	3920	4280
<b>Cobertura vegetal</b>	Predomina el uso agrícola y ganadero, con presencia de haciendas lecheras y amplias zonas de pastizales.	Presencia de bosque nativo, eucalipto, páramo y pastos; en zonas bajas existen áreas intervenidas para uso ganadero y asentamientos humanos.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Vallejo, 2014).

Como se observa, el río Yanuncay presenta mayores caudales característicos, lo que evidencia una respuesta hidrológica más significativa frente a eventos de precipitación. Por otro lado, el río Tarqui presenta una mayor superficie de cuenca y un uso de suelo predominantemente agropecuario, lo que influye en los procesos de escorrentía superficial.

### 3.2 Problemas existentes en el área de estudio

El análisis de eventos históricos evidencia que los ríos Tarqui y Yanuncay han presentado crecidas significativas que han generado inundaciones, afectación a infraestructura y pérdidas materiales en diferentes sectores del cantón Cuenca. Entre los eventos más relevantes se destacan los ocurridos en 1999, 2005, 2007 y 2012, los cuales ocasionaron el desbordamiento de los cauces, evacuación de población y daños en actividades agrícolas y ganaderas. Estos antecedentes reflejan la vulnerabilidad de ambas cuencas frente a eventos hidrometeorológicos extremos (Tabla 6). En este contexto, una consultoría realizada para el Municipio de Cuenca determinó que los caudales de

desbordamiento corresponden aproximadamente a 160 m<sup>3</sup>/s para el río Yanuncay y 90 m<sup>3</sup>/s para el río Tarqui, valores que representan condiciones críticas de flujo y que permiten dimensionar la magnitud de estos eventos y su impacto en la zona de estudio (Naranjo, 2018; Vallejo, 2014).

*Tabla 6 Principales eventos de crecida registrados en los ríos Tarqui y Yanuncay.*

<b>Año</b>	<b>Río</b>	<b>Sector afectado</b>	<b>Principales afectaciones</b>
<b>1999</b>	Tarqui	Guzho Bajo	Desbordamiento del río, inundación de viviendas, cancha deportiva y áreas agrícolas.
<b>2005</b>	Yanuncay	Soldados, Bayán, Chugchugud, Barabón	Aislamiento de barrios, evacuación de familias, destrucción de puentes peatonales y pérdidas en actividades agropecuarias.
<b>2006</b>	Tarqui	Sector Cumbe e Irquis	Inundación de zonas ganaderas, afectación a viviendas y pérdidas materiales.
<b>2007</b>	Yanuncay y Tarqui	Zona urbana de Cuenca	Desbordamiento en zona urbana, colapso de infraestructura, destrucción de puente y pérdida de una vida humana.
<b>2008</b>	Tarqui	Victoria del Portete	Desbordamiento del río y afectación a zonas aledañas.
<b>2012</b>	Tarqui y Yanuncay	El Salado, Huizhil, Victoria del Portete, Av. de las Américas	Inundaciones extensas, evacuación de personas, daños en viviendas, pérdida de animales y afectación a infraestructura vial.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Naranjo, 2018; Vallejo, 2014).

Por otro lado, el estudio realizado por Naranjo (2018) reporta que el río Tarqui ha registrado caudales máximos de hasta 104,09 m<sup>3</sup>/s, destacándose el evento ocurrido el 4 de mayo de 2007. De igual forma, el río Yanuncay ha presentado crecidas significativas, siendo la más relevante la registrada el 14 de mayo de 2017 (Figura 6), con un caudal de 250,69 m<sup>3</sup>/s. Asimismo, se identificó que los meses de mayor riesgo hidrológico corresponden a febrero y abril para el río Tarqui, mientras que en el río Yanuncay los meses más críticos son mayo y junio, periodos en los que se han presentado los eventos de mayor magnitud.



*Figura 6 Desbordamiento del río Yanuncay el 14 de mayo 2017 Fuente: (Fernandez de Cordova, 2021)*

Estas limitaciones han motivado la implementación de medidas dentro del Plan de Contingencia frente a eventos invernales en el cantón Cuenca. Sin embargo, la medición de parámetros hidráulicos en condiciones de crecida presenta dificultades, especialmente en zonas de difícil acceso o donde las altas velocidades del flujo representan un riesgo para el personal y los equipos, lo que restringe la aplicación de métodos tradicionales como el molinete. En este contexto, y considerando la limitada aplicación de técnicas alternativas en el país, la incorporación de métodos no intrusivos como Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) representa una alternativa viable para la estimación de variables hidráulicas en condiciones extremas, aportando información confiable y contribuyendo al fortalecimiento de los procesos de monitoreo hidrológico (Massó, 2018).

### **3.3 Descripción de materiales empleados para la recolección de datos**

Para la aplicación de la técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) se emplearon equipos orientados a la adquisición, control y procesamiento de información hidrodinámica. Estos recursos permitieron la captura de imágenes aéreas del flujo, la definición geométrica de la sección transversal mediante puntos de referencia y el

procesamiento digital de los datos para la obtención de los campos de velocidad superficial. Asimismo, se utilizaron herramientas informáticas especializadas para la rectificación, escalamiento y análisis de los registros, garantizando la trazabilidad y consistencia de los resultados obtenidos. En la (Tabla 9) se presentan los principales materiales e instrumentos utilizados en la investigación

*Tabla 7 Materiales e instrumentos utilizados en la investigación.*

<b>Componente</b>	<b>Uso principal</b>	<b>Resultado generado</b>
<b>Dron</b>	Captura de imágenes aéreas del tramo de estudio para el registro del movimiento superficial del flujo	Videos georreferenciados con cobertura espacial del área de estudio
<b>Estación total</b>	Levantamiento topográfico de la sección transversal y determinación de la geometría del cauce	Perfil batimétrico y coordenadas de la sección analizada
<b>Referencias visibles o marcas de control (CPs)</b>	Rectificación geométrica y escalamiento de las imágenes	Sistema de referencia espacial para la transformación y calibración
<b>Trazadores flotantes.</b>	Visualización del movimiento superficial del flujo y mejora de la detección de velocidades	Patrones de desplazamiento superficial identificables en el video
<b>Computador</b>	Procesamiento, almacenamiento y gestión de los datos obtenidos	Base de datos digital estructurada y archivos de procesamiento
<b>Software RIVeR y PIVlab</b>	Procesamiento de imágenes y cálculo del campo vectorial de velocidad superficial	Campos de velocidad superficial, mapas vectoriales y estimación de caudal

Fuente: Elaboración a partir (Aldana Quizhpi & Tsenkush Shakai, 2024; Patalano et al., 2017)

Posterior a la selección de los materiales, el dron constituyó el equipo principal para la adquisición de los registros audiovisuales, permitiendo obtener una vista cenital del flujo y garantizando una adecuada cobertura del área de estudio. La geometría de la sección transversal fue determinada mediante el uso de una estación total, lo que permitió

obtener el perfil batimétrico necesario para el análisis hidráulico y la estimación del caudal.

Para la rectificación geométrica y el escalamiento de las imágenes, se emplearon puntos de control distribuidos en el área de estudio, los cuales sirvieron como referencia espacial durante el procesamiento. En este caso, no fue necesaria la incorporación de trazadores artificiales, debido a que las características naturales de la superficie del flujo, como variaciones de textura, reflectancia y pequeñas estructuras turbulentas, permitieron identificar y rastrear el movimiento superficial del agua de forma adecuada, manteniendo el carácter no intrusivo de la técnica.

El procesamiento de los registros se realizó mediante el software RIVeR y el programa PIVlab, los cuales permitieron obtener los campos vectoriales de velocidad superficial y la estimación del caudal en cada sección analizada. Finalmente, los resultados fueron almacenados y organizados en formato digital, facilitando su análisis, validación e interpretación (Patalano et al., 2017).

### **3.4 Recolección de datos**

A continuación, se describe el proceso de adquisición de datos en campo, orientado a la obtención de velocidades superficiales y la estimación de caudales mediante la aplicación de la técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV). Esta información fue utilizada posteriormente para la validación y análisis de los resultados, con el fin de evaluar la precisión del método.

El procedimiento se desarrolló en las siguientes etapas:

- a) **Delimitación del área y levantamiento topográfico:** Se definieron las secciones de estudio y, mediante una estación total, se establecieron los puntos de control (CPs) y

se realizó el levantamiento de los perfiles batimétricos durante la época de estiaje, con el fin de obtener la geometría del cauce

- b) **Procesamiento de la información topográfica:** Los datos levantados en campo fueron procesados en gabinete para determinar las distancias entre los puntos de control y elaborar las batimetrías de cada sección. La identificación de las secciones se realizó siguiendo la nomenclatura empleada por (Aldana Quizhpi & Tsenkush Shakai, 2024), donde AJ corresponde a aguas arriba de la confluencia y DJ a aguas abajo de la confluencia.
- c) **Adquisición de imágenes:** Se realizaron vuelos con dron sobre cada sección, con una duración aproximada de 4 a 5 minutos, asegurando la visibilidad de los puntos de control y de la superficie del flujo. Este tiempo de registro se encuentra dentro de los rangos recomendados en la literatura para el procesamiento mediante LSPIV, donde se señala que secuencias de 30 segundos a 2 minutos son suficientes para estimar velocidades superficiales representativas (Flora, 2017; Lewis & Rhoads, 2018).
- d) **Trazadores superficiales:** En este caso en particular No se utilizaron trazadores artificiales, ya que se emplearon trazadores naturales, como espuma y partículas transportadas por el flujo, los cuales permitieron identificar el movimiento superficial del agua.

### 3.5 Aplicación de la Técnica LSPIV

La técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) es un método óptico no intrusivo utilizado para estimar la velocidad superficial del flujo mediante el seguimiento de trazadores visibles en secuencias de imágenes (Patalano et al., 2017). Su principio es similar

al de la técnica PIV aplicada en laboratorio, con la diferencia de que LSPIV se emplea en ambientes naturales, donde es necesario realizar correcciones geométricas debido al ángulo de captura, la escala de la imagen y las condiciones de iluminación (Muste et al., 2008).

Para ello, las imágenes son rectificadas utilizando puntos de control (CPs), lo que permite transformar las coordenadas de los píxeles en coordenadas reales. Posteriormente, mediante el uso del software RIVeR, se aplica un análisis de correlación cruzada entre fotogramas consecutivos para obtener el campo de velocidades superficiales. Finalmente, la velocidad superficial es convertida a velocidad media mediante un coeficiente de corrección, lo que permite estimar el caudal en función de la geometría de la sección transversal (Dramais et al., 2011).

### **3.5.1 Procesamiento de video a imagen**

Como parte de la aplicación de la técnica LSPIV, el material audiovisual obtenido en campo fue procesado mediante el software RIVeR, el cual permite descomponer el video en una secuencia de fotogramas individuales. Para ello, se definió una frecuencia de procesamiento acorde a la calidad del registro, generalmente entre 15 y 30 fotogramas por segundo (FPS), con el fin de garantizar una adecuada resolución temporal del movimiento superficial (Figura 7).

Posteriormente, los fotogramas fueron convertidos a formato de escala de grises (grayscale), lo que permite optimizar el análisis al reducir la carga computacional y mejorar la detección de patrones superficiales. Las imágenes generadas fueron almacenadas automáticamente en una carpeta asociada al video original, manteniendo su orden temporal y permitiendo su posterior uso en el proceso de rectificación geométrica y cálculo de velocidades superficiales (Patalano et al., 2017).

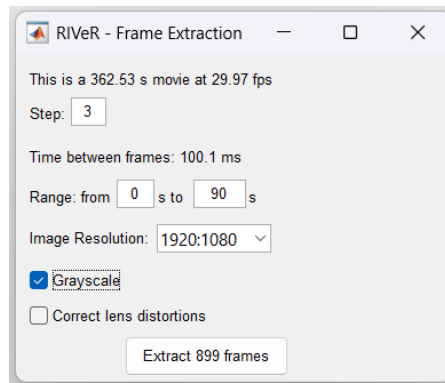


Figura 7 Extracciones de imágenes con Software River (Fuente; Propia)

### 3.5.2 Velocimetría de imágenes en software PIVLab

El software PIVlab permite estimar el campo de velocidades mediante el seguimiento del desplazamiento de patrones superficiales entre pares consecutivos de imágenes, utilizando un enfoque vectorial basado en el método euleriano. Este procedimiento analiza la secuencia de fotogramas en intervalos sucesivos (por ejemplo, 1-2, 2-3, 3-4) (Figura 8), lo que permite calcular el desplazamiento de las partículas entre cada par de imágenes y determinar la dirección y magnitud de la velocidad superficial del flujo (Patalano et al., 2017; Thielicke & Stamhuis, 2014).

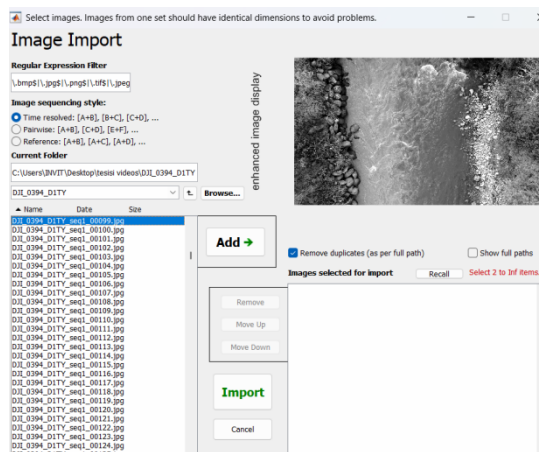
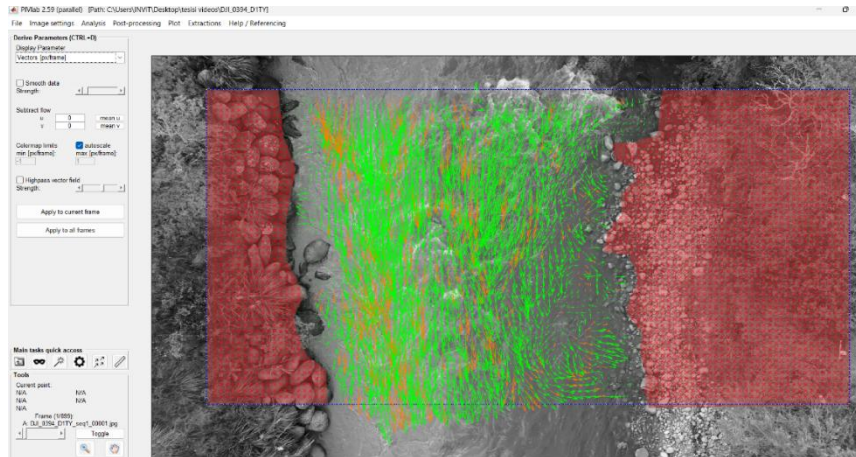


Figura 8 Secuencia de Fotogramas y procesamiento en PIVlab (Fuente; Propia)

Previo al análisis, es necesario definir la región de interés (Region of Interest, ROI) (Figura 9), la cual corresponde al área específica donde existe movimiento del flujo y se

representa por sección de color azul. Esta selección permite excluir zonas sin desplazamiento, como orillas, rocas expuestas o estructuras, que podrían afectar la precisión del cálculo y aumentar el costo computacional. Asimismo, es posible aplicar máscaras de color rojo dentro del ROI para eliminar áreas que no representan el flujo superficial y evitar interferencias durante el procesamiento.



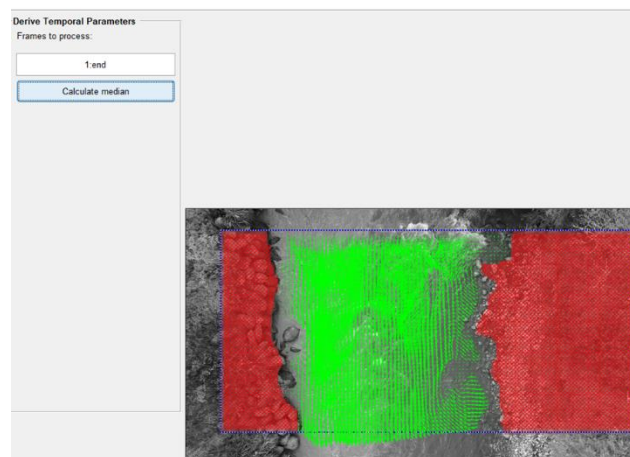
*Figura 9 Pre-Proceso PIVlab (Fuente; Propia)*

El preprocesamiento de imágenes constituye una etapa fundamental para mejorar la calidad de los resultados. En este estudio se emplearon filtros como el CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization), el cual mejora el contraste de la imagen mediante la redistribución de los niveles de intensidad, y el filtro de paso alto (high-pass), que permite resaltar las estructuras de alta frecuencia asociadas al movimiento superficial del flujo (Thielicke & Stamhuis, 2014). Estas técnicas facilitan la identificación de patrones y mejoran la correlación entre imágenes.

El cálculo del campo de velocidades se realiza mediante algoritmos de correlación cruzada, los cuales determinan el desplazamiento promedio de los patrones dentro de pequeñas ventanas de interrogación distribuidas en la imagen. PIVlab permite utilizar diferentes métodos, siendo el más recomendado el algoritmo de deformación de ventana

basado en la Transformada Rápida de Fourier (FFT), debido a su mayor precisión, mejor relación señal-ruido y capacidad para representar variaciones espaciales del flujo (Massó, 2018; Patalano et al., 2017; Thielicke & Stamhuis, 2014).

Una vez obtenido el campo vectorial para cada par de imágenes, se aplicó la herramienta Calculate median (Figura 10), la cual permite calcular el campo de velocidades promedio mediante la mediana de los vectores obtenidos durante todo el periodo de análisis. Este procedimiento reduce la influencia de valores atípicos y fluctuaciones locales, generando un campo de velocidades más representativo y estable del comportamiento del flujo. El resultado corresponde a un campo vectorial en coordenadas de imagen, el cual constituye el insumo fundamental para el posterior proceso de rectificación geométrica en el software RIVeR, donde las velocidades son transformadas a unidades físicas reales y utilizadas para la estimación del caudal (Patalano et al., 2017).



*Figura 10 Campo vectorial promedio obtenido mediante la herramienta Calculate median en PIVlab (Fuente: Propia).*

Finalmente, el campo vectorial promedio obtenido permitió representar la distribución espacial de la velocidad superficial del flujo en la sección analizada, constituyendo la base para el análisis hidrodinámico posterior.

### **3.6 Aplicación del Software River**

Los campos de velocidades obtenidos en PIVlab se encuentran inicialmente en coordenadas de imagen, expresados en unidades de píxel por unidad de tiempo, por lo que es necesario realizar un proceso de rectificación geométrica para convertir estos resultados en coordenadas reales. Para este propósito, se utilizó el software RIVeR (Rectification of Image Velocity Results), el cual permite transformar los campos vectoriales a un sistema de referencia físico mediante el uso de puntos de control medidos en campo (Patalano et al., 2017).

Este procedimiento permite corregir los efectos de perspectiva asociados al ángulo de captura de la cámara y definir la escala espacial del análisis, lo que posibilita expresar las velocidades en unidades físicas reales, como metros por segundo.

#### **3.6.1 Orto-Rectificación de imágenes**

El proceso de rectificación en RIVeR no modifica las imágenes originales, sino que transforma el campo vectorial previamente calculado en PIVlab. Para ello, se selecciona un fotograma base, sobre el cual se definen los puntos de control (CPs), cuyas coordenadas y distancias reales fueron medidas previamente en campo (Figura 11).



Figura 11 Ingreso de distancias reales entre puntos de control para la rectificación geométrica en el software RIVER (Fuente: Propia)

Estos puntos permiten calcular una matriz de transformación geométrica (homografía), la cual establece la relación entre el sistema de coordenadas de la imagen y el sistema de coordenadas reales (Figura 12). Este procedimiento corrige las distorsiones causadas por la perspectiva y permite obtener velocidades en unidades físicas reales (Patalano et al., 2017).

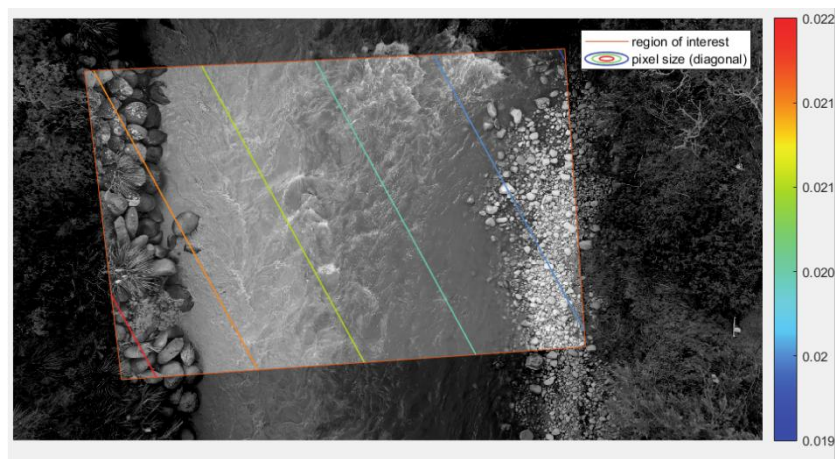


Figura 12 Región de interés rectificada y definición de la escala espacial del píxel en el software RIVER (Fuente: Propia).

Asimismo, se define una nueva región de interés (ROI), la cual delimita el área correspondiente al flujo, excluyendo zonas sin movimiento, como orillas o superficies emergidas.

Otro parámetro fundamental es de el intervalo de tiempo entre fotogramas (Figura 13), el cual se calcula a partir de la frecuencia de la adquisición de la siguiente expresión:

$$t = \frac{1000}{FPS}$$

Donde:

t = intervalo de tiempo entre imágenes (ms)

FPS = fotograma por segundo



Figura 13 Definición del tiempo de muestreo (sampling time) para la conversión de velocidades en el software RIVeR (Fuente: Propia).

Este valor es necesario para convertir los desplazamientos medidos en velocidades reales. Como resultado, se obtiene un campo vectorial orto-rectificado que representa la distribución espacial de la velocidad superficial en coordenadas reales (Figura 14).

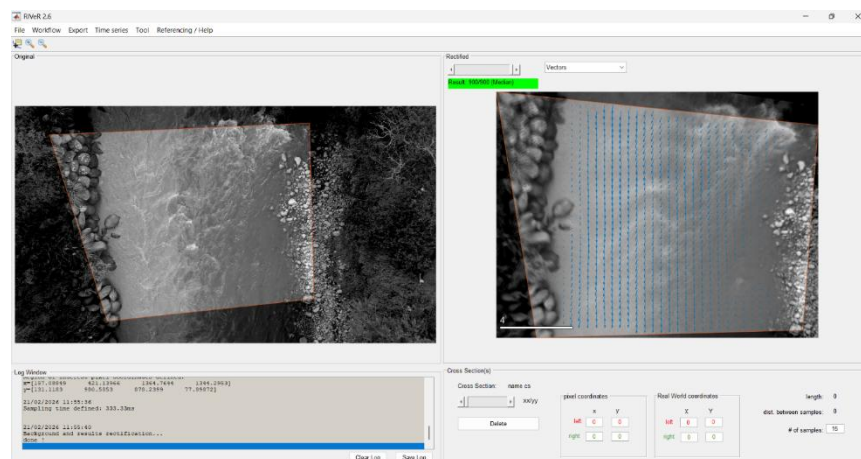
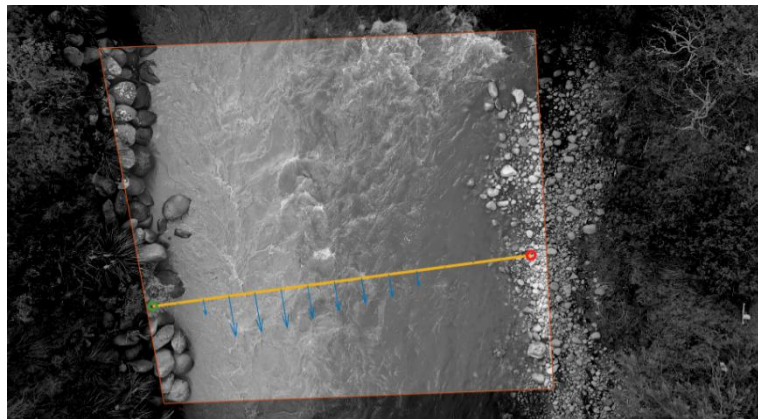


Figura 14 Campo vectorial de velocidades superficiales en coordenadas reales tras la rectificación geométrica en el software RIVeR (Fuente: Propia).

### 3.6.2 Incorporación de la batimetría de la sección transversal.

Una vez obtenido el campo de velocidades orto-rectificado, se incorpora el perfil batimétrico de la sección transversal, previamente levantado en campo mediante estación total.

Sobre la imagen rectificada (Figura 15), se traza la sección transversal de análisis, permitiendo relacionar la distribución de velocidades superficiales con la geometría real del cauce.



*Figura 15 Definición de la sección transversal para la estimación del caudal mediante LSPIV en el software RIVeR (Fuente: Propia).*

Debido a que existen múltiples vectores dentro de cada área de análisis, el software calcula el valor promedio de velocidad en cada celda, obteniendo una representación más estable y representativa del flujo.

### 3.6.3 Caudales de salida LSPIV

El software RIVeR permite calcular el caudal mediante el método de las secciones medias, el cual consiste en dividir la sección transversal en múltiples subsecciones verticales.

El caudal se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$Q = \sum (V_m * A)$$

$Q$  = caudal

$V_m$  = velocidad media

$A$  = área de cada subsección

Para la estimación del caudal a partir de las velocidades superficiales obtenidas mediante la técnica LSPIV, fue necesario aplicar un factor de corrección con el fin de aproximar la velocidad media del flujo en la sección transversal (Figura 16). En ríos y canales abiertos, la velocidad superficial suele ser mayor que la velocidad media debido a la influencia de la fricción en el lecho y las márgenes, por lo que diversos estudios recomiendan emplear coeficientes de conversión comprendidos entre 0,80 y 1. En este estudio se adoptó un coeficiente de 0,85, valor ampliamente utilizado en aplicaciones de velocimetría superficial y en estudios de LSPIV, para estimar la velocidad media representativa del flujo (Dramais et al., 2011; Muste et al., 2008).

Este procedimiento permite estimar el caudal de forma no intrusiva, sin contacto directo con el flujo, siendo especialmente útil en condiciones de difícil acceso o caudales elevados (Patalano et al., 2017).

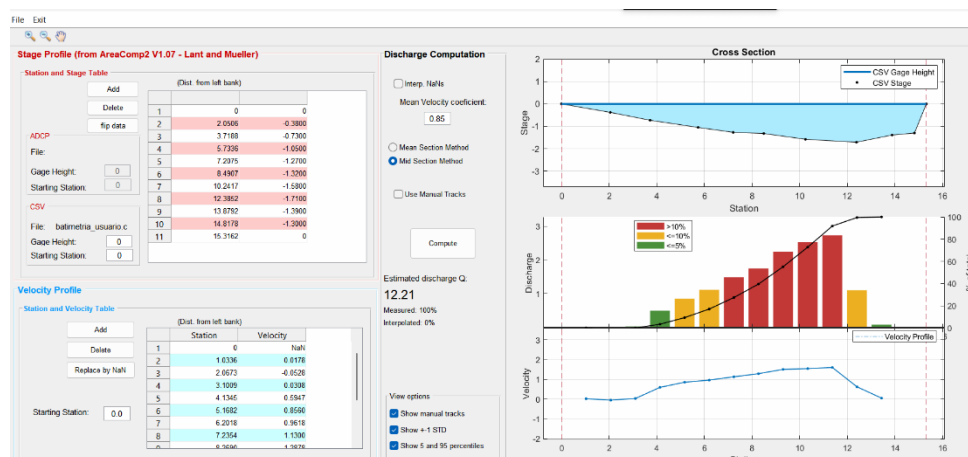


Figura 16 Integración del perfil batimétrico y campo de velocidades para la estimación del caudal en el software RIVER (Fuente: Propia)

### **3.7 Control de calidad y confiabilidad del procedimiento**

El control de calidad del procesamiento LSPIV se estableció como una etapa sistemática del flujo de trabajo con el objetivo de garantizar la consistencia de los resultados. En cada sesión se verificó la calidad del video, la correcta ubicación de los puntos de control para la orto-rectificación, la delimitación de la región de interés y la coherencia espacial del campo vectorial, además de la identificación y eliminación de vectores atípicos. La confiabilidad del procedimiento se aseguró mediante el uso de parámetros de procesamiento consistentes, la conservación de los archivos originales y el registro de las configuraciones aplicadas en PIVlab y RIVeR, permitiendo la trazabilidad y reproducibilidad del análisis (Patalano et al., 2017; Thielicke & Stamhuis, 2014).

Adicionalmente, los caudales estimados mediante la técnica LSPIV fueron contrastados con los registros hidrológicos proporcionados por la empresa pública ETAPA EP cuando se dispuso de datos correspondientes al periodo de medición. Esta comparación permitió verificar la coherencia hidráulica de los resultados obtenidos y evaluar el grado de concordancia entre las estimaciones derivadas del procesamiento de imágenes y las mediciones hidrométricas convencionales. De esta manera, la validación cruzada con información instrumental contribuyó a reforzar la confiabilidad del procedimiento y a sustentar la aplicabilidad de la técnica LSPIV en la estimación de caudales en cauces naturales (Muste et al., 2008).

## **4. CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones de velocimetría superficial obtenidas mediante la metodología LSPIV en diferentes secciones transversales de los ríos Tarqui, Yanuncay y en la confluencia de ambos cauces, bajo condiciones de caudales extremos. Previamente, en cada sección se realizó el levantamiento del perfil transversal con estación total durante la época de estiaje entre los meses de septiembre y diciembre, con el fin de definir con precisión la geometría del cauce y reducir incertidumbres en los cálculos hidráulicos.

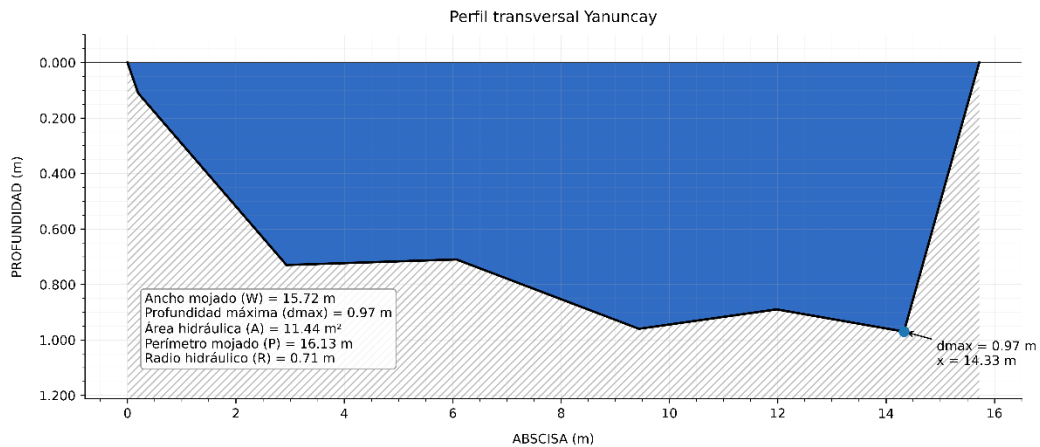
Con base en esta información, se exponen las batimetrías, los campos de velocidad superficial generados con el software RIVER y los caudales estimados en cada sitio de estudio, lo que permite analizar el comportamiento hidráulico del flujo y comparar las condiciones hidrodinámicas entre las secciones evaluadas. Para la validación, los resultados fueron contrastados con datos proporcionados por ETAPA EP, entidad responsable del monitoreo y control de las fuentes hídricas del cantón Cuenca.

En total se realizaron ocho mediciones, de las cuales seis fueron procesadas e incorporadas al análisis final, mientras que dos se descartaron por no cumplir con las condiciones de representatividad establecidas para el estudio. La campaña de adquisición de datos se desarrolló entre finales de enero y mediados de febrero del presente año.

### **4.1 Recolección de Datos de la Primera Campaña:**

#### **4.1.1 Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui**

La batimetría de la zona de estudio se obtuvo mediante un levantamiento topográfico, previo, en esta fase tan solo se toma el nivel del agua, de cada medición, Teniendo un ancho de 15.72 m y una profundidad máxima de 0.97 m, como se observa en la (Figura 17), con una vista desde aguas arriba hacia aguas abajo.



*Figura 17 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)*

La (Figura 18) presenta la sección transversal analizada mediante el software RIVER y el campo de velocidades vectoriales obtenido con la técnica LSPIV. A partir de este procesamiento se generaron los campos de velocidad superficial para el punto de control Yanuncay AJ Tarqui, cuya distribución se muestra en la (Figura 19).

La técnica LSPIV, basada en el seguimiento de partículas superficiales en secuencias de imágenes, permitió estimar la velocidad promedio en cada celda de análisis y construir la distribución espacial del flujo. Durante la campaña no se identificaron obstáculos significativos que afectaran el procesamiento. Las menores velocidades se registran en los márgenes, debido al efecto de fricción lateral y la menor profundidad, mientras que en la zona central del cauce se concentran las mayores magnitudes, asociadas a un flujo más uniforme. La velocidad máxima registrada en el área de estudio fue de 1.402 m/s.

Estos resultados permiten caracterizar la variabilidad transversal del flujo y constituyen la base para la estimación del caudal en la sección analizada.

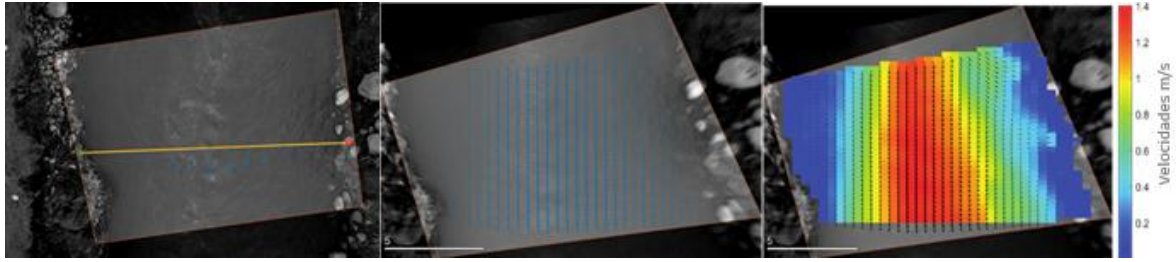


Figura 18 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s

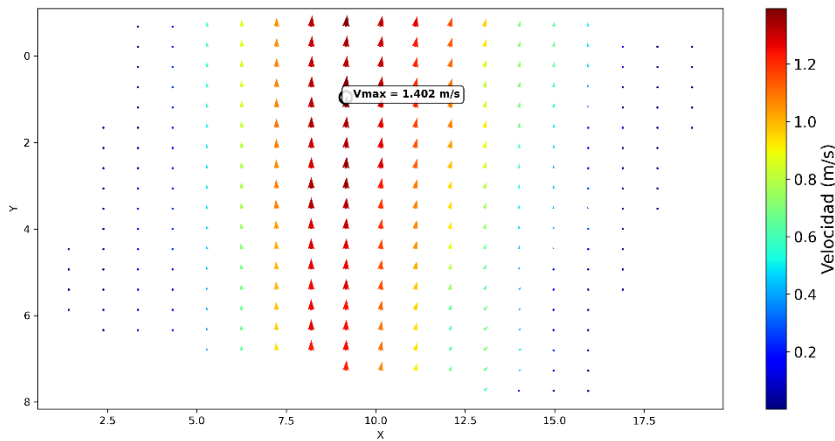


Figura 19 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente: Propia)

El perfil de velocidades superficiales (Figura 21) obtenido mediante LSPIV en la sección transversal del río Yanuncay presenta una distribución no uniforme, con valores cercanos a 0 m/s en ambas márgenes debido al efecto de fricción lateral y la menor profundidad.

La velocidad aumenta progresivamente hacia la zona central del cauce, donde se registra la velocidad máxima de 1.351 m/s en la abscisa 10.197 m, coincidiendo con una de las mayores profundidades medidas. Este comportamiento es consistente con la dinámica hidráulica de cauces naturales, en los que las mayores velocidades se concentran en la zona de mayor tirante. La integración de la distribución de velocidades permitió estimar un caudal total de 7.958 m<sup>3</sup>/s para la sección analizada (Tabla 8).

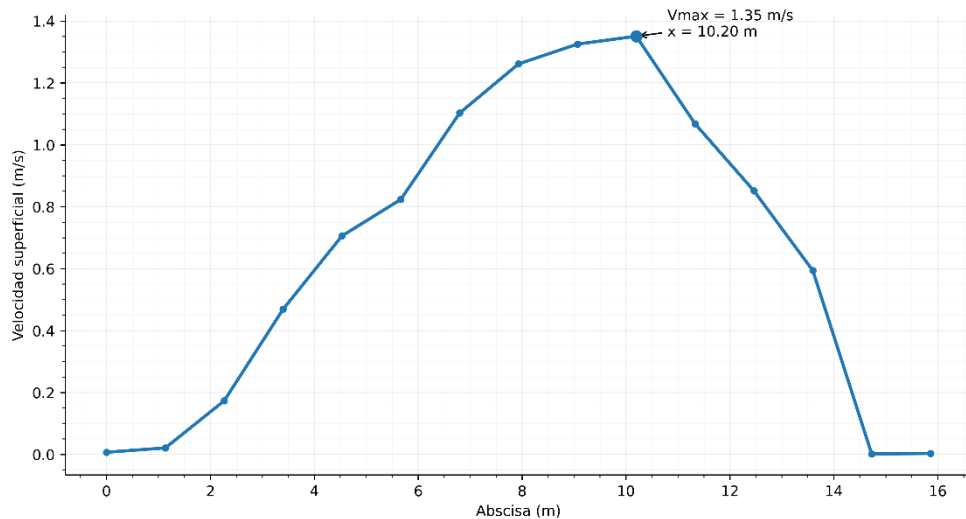


Figura 20 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

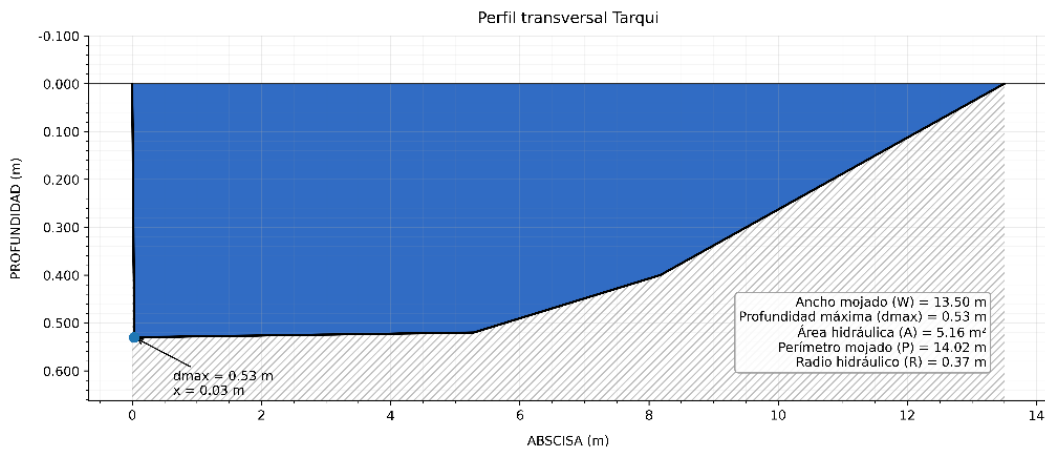
Tabla 8 Velocidades y Caudales con LSPIV Primera Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m <sup>3</sup> /s)
0,000	0,000	0,007	0,000
1,133	0,322	0,021	0,007
2,266	0,579	0,173	0,097
3,399	0,727	0,469	0,328
4,532	0,720	0,706	0,489
5,665	0,713	0,824	0,565
6,798	0,764	1,103	0,811
7,931	0,848	1,261	1,030
9,064	0,932	1,325	1,190
10,197	0,939	1,351	1,222
11,330	0,908	1,068	0,934
12,463	0,906	0,851	0,743
13,596	0,945	0,594	0,541
14,729	0,691	0,002	0,001
15,863	0,000	0,003	0,000
<b>TOTAL</b>			<b>7,958</b>

#### 4.1.2 Medición en el río Tarqui AJ Yanuncay

La batimetría levantada en esta sección se muestra en la (Figura 21), presentada en una vista desde aguas arriba hacia aguas abajo. la cual posee un ancho de 13.50 m y una profundidad máxima de 0.53 m. Al estar ubicada la sección aledaña a un puente, se

identifican muros o paredes verticales que condicionan la geometría del perfil, generando límites laterales más definidos y modificando la distribución del flujo.



*Figura 21 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia)*

La (Figura 22), muestra el área del estudio, la sesión transversal analizada, y los campos de velocidades vectoriales con los cuales se obtienen los campos de velocidades. En el área de estudio no se registran obstáculos significativos que afecten al procesamiento. En el campo de velocidades (Figura 23) se observa que las mayores magnitudes se concentran en la zona media-izquierda de la sección, donde el flujo presenta mayor continuidad y menor influencia de fricción lateral dando como una velocidad máxima 1.577 m/s. En contraste, hacia las orillas las velocidades disminuyen progresivamente debido a la menor profundidad y la interacción con las estructuras del puente.



Figura 22 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s

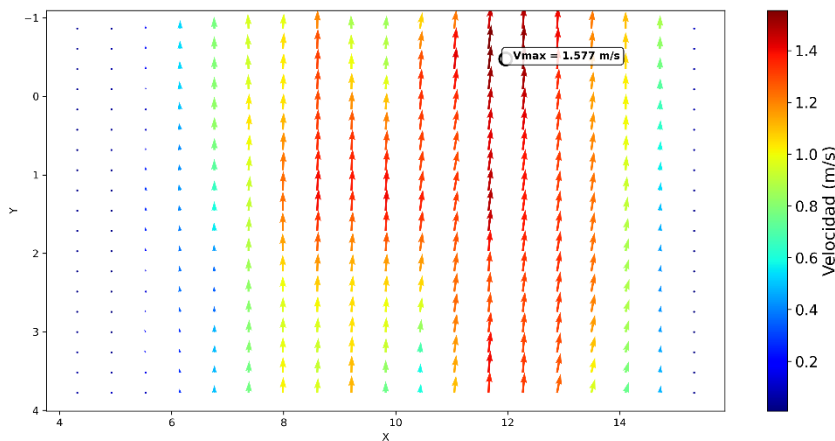


Figura 23 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente: Propia)

En la (Figura 24) el perfil de velocidades superficiales en la sección transversal del río Tarqui presenta una distribución no uniforme, con valores cercanos a 0 m/s en ambas márgenes debido al efecto de fricción lateral y la menor profundidad.

La velocidad aumenta progresivamente hacia la zona central del cauce; sin embargo, se observa una disminución puntual seguida de un nuevo incremento. Este comportamiento se asocia a la presencia de piedras en el lecho, que generan perturbaciones locales y redistribución del flujo, provocando aceleraciones posteriores. La velocidad máxima registrada fue de 1.465 m/s en la abscisa 4.168 m, coincidiendo con una de las mayores profundidades medidas (Tabla 9).

Este patrón es coherente con la dinámica hidráulica de cauces naturales, donde las mayores velocidades tienden a concentrarse en las zonas de mayor tirante. La integración de la distribución de velocidades permitió estimar un caudal total de 4.16 m<sup>3</sup>/s en la sección analizada.

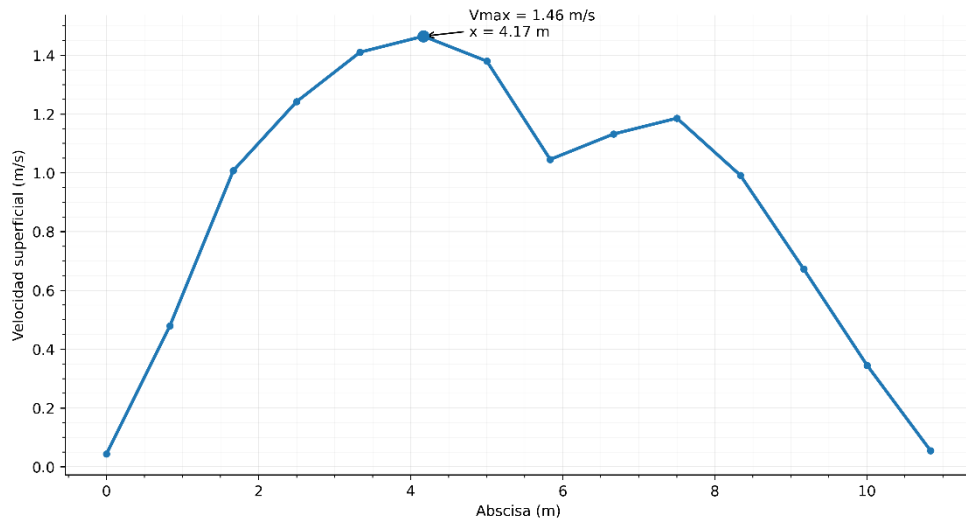


Figura 24 Perfil de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 9 Velocidades y Caudales con LSPIV Primera Campaña Tarqui (Fuente; Propia)

<b>Abscisa (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Velocidad con LSPIV (m/s)</b>	<b>Caudal con LSPIV (m<sup>3</sup>/s)</b>
0,000	0,000	0,044	0,000
0,834	0,528	0,479	0,179
1,667	0,527	1,007	0,376
2,501	0,525	1,242	0,462
3,334	0,524	1,410	0,523
4,168	0,522	1,465	0,542
5,002	0,521	1,380	0,509
5,835	0,497	1,046	0,368
6,669	0,463	1,132	0,371
7,502	0,428	1,186	0,360
8,336	0,388	0,992	0,272
9,170	0,325	0,672	0,155
10,003	0,263	0,345	0,064
10,837	0,200	0,055	0,004
<b>TOTAL</b>			<b>4,186</b>

### 4.1.3 Medición en río Yanuncay DJ río Tarqui

En la zona de confluencia de ambos cauces se obtuvo la batimetría mostrada en la (Figura 25) correspondiente, con una vista orientada desde aguas arriba hacia aguas abajo. La sección presenta un ancho mojado de 15,32 m y una profundidad máxima de 1,71 m.

El punto de análisis se localiza aguas abajo de la unión de los ríos, en el sector del puente de la UDA (Universidad del Azuay), donde la interacción de ambos flujos condiciona la geometría y el comportamiento hidráulico de la sección.

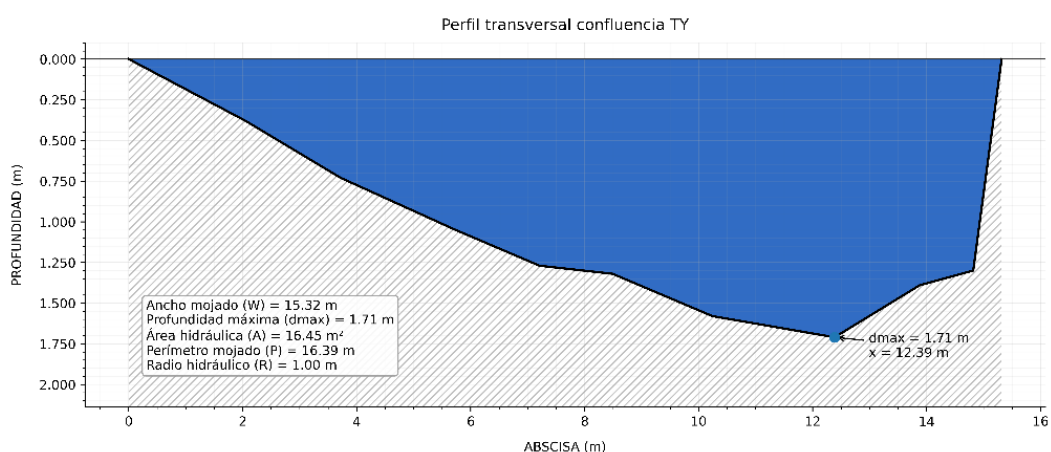


Figura 25 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

Se registran mayores velocidades en la zona media izquierda de la sección, como se observa en los campos de velocidad (Figura 26), asociadas a la mayor profundidad y a la concentración del flujo principal en ese sector. En esta área se alcanza una velocidad máxima de 2.076 m/s, evidenciando una zona de aceleración producto de la interacción de los caudales en la confluencia (Figura 27).

En contraste, hacia las márgenes las velocidades disminuyen significativamente debido a la menor profundidad y a la presencia de material rocoso, principalmente cantos rodados de gran tamaño, que incrementan la rugosidad del lecho y generan mayor resistencia

hidráulica. Estas condiciones favorecen la disipación de energía y la reducción local de la velocidad.

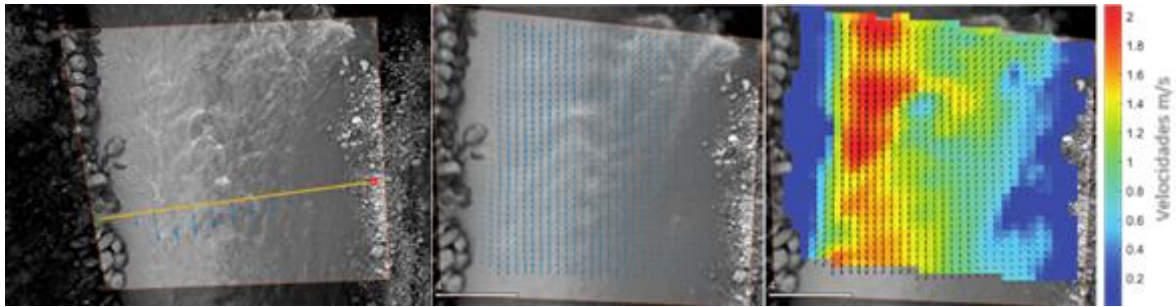


Figura 26 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s

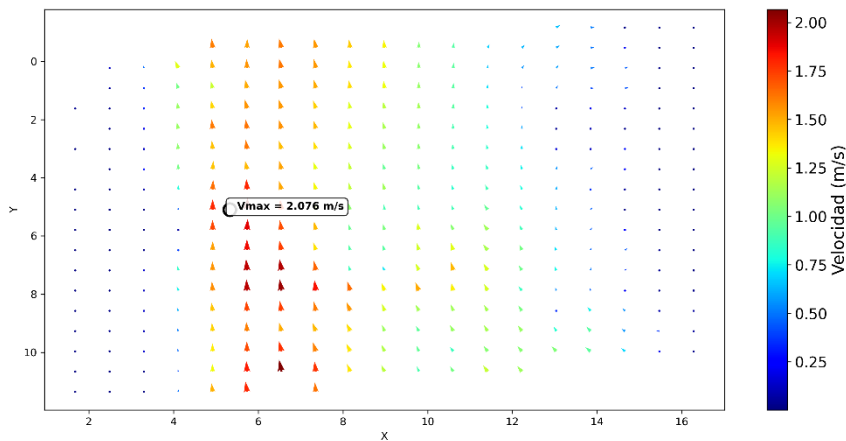


Figura 27 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

En la (Figura 28) el perfil de velocidades superficiales en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay presenta un comportamiento ascendente con un máximo puntual de 1.57 m/s ubicado en la abscisa 11.78 m. Esta distribución de energía en la sección transversal da como resultado un caudal total de 12.513 m<sup>3</sup>/s. Dicho valor guarda una relación lógica y proporcional con el aporte hídrico de ambos ríos, validando la precisión de la toma de datos en esta campaña (Tabla 10).

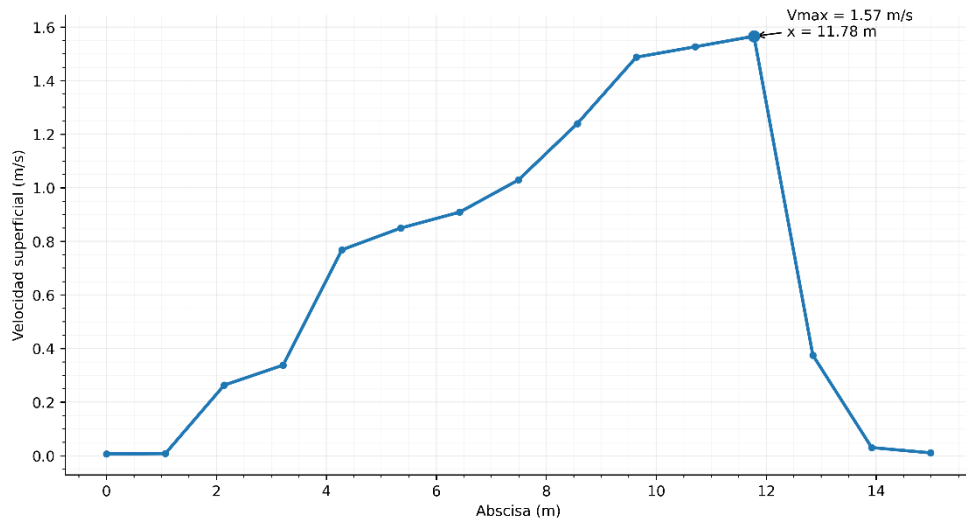


Figura 28 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 10 Velocidades y Caudales con LSPIV Primera Campaña Confluencia (Fuente; Propia)

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m <sup>3</sup> /s)
0,000	0,000	0,007	0,000
1,071	0,198	0,008	0,001
2,141	0,399	0,263	0,096
3,212	0,624	0,338	0,192
4,283	0,820	0,769	0,573
5,353	0,990	0,850	0,765
6,424	1,153	0,909	0,954
7,495	1,281	1,030	1,201
8,565	1,331	1,240	1,502
9,636	1,490	1,488	2,017
10,707	1,608	1,527	2,234
11,777	1,673	1,566	2,384
12,848	1,611	0,375	0,550
13,919	1,386	0,030	0,038
14,989	0,852	0,011	0,004
<b>TOTAL</b>			<b>12,513</b>

#### 4.1.4 Validación de resultados Primera Campaña

Una vez obtenidos los valores de velocidad y caudal mediante la metodología LSPIV, se procedió a compararlos con los datos reportados por ETAPA EP, obtenidos desde su

página oficial. confirman la confiabilidad de la metodología aplicada y su adecuada representación de las condiciones hidráulicas reales en los sitios de estudio (Tabla 11).

*Tabla 11 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Primera Campaña.*

<b>Rio</b>	<b>Primera Campaña</b>		
	Etapa m <sup>3</sup> /s	LSPIV m <sup>3</sup> /s	Variación %
<b>Yanuncay</b>	8,39	7,958	5,15
<b>Tarqui</b>	4,13	4,18	1,21
<b>Confluencia</b>	12,52	12,513	0,06

A partir de esta comparación, se observa que el río Yanuncay presenta una variación del 5.15 %, esta variación podría ser atribuida principalmente a las variaciones profundidad, la distribución del campo de velocidad, así como de la sección transversal analizada. En el río Tarqui, la variación es de 1.21 %, lo que evidencia una buena concordancia entre ambos métodos, asociada a una distribución de flujo más uniforme en la sección analizada. Por su parte, en la confluencia se registra una variación mínima de 0.06 %, indicando una alta precisión en la estimación mediante LSPIV, favorecida por una mayor profundidad y una mejor definición del flujo principal, lo que permite una relación más representativa entre la velocidad superficial y la velocidad media.

## **4.2 Recolección de Datos de la Segunda Campaña**

### **4.2.1 Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui**

La batimetría correspondiente a esta sección se presenta en la (Figura 29), donde se observa que la mayor profundidad se concentra hacia el margen derecho, alcanzando un valor máximo de 0.88 m, mientras que en la zona media se presentan variaciones del lecho con profundidades menores. El abscisado fue tomado a lo largo de un ancho mojado de 15.43 m. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.

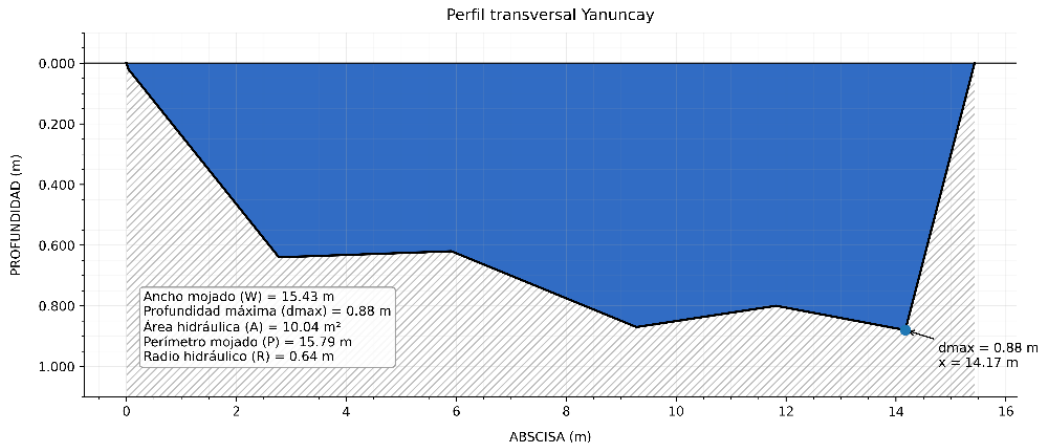


Figura 29 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

En la sección analizada (Figura 30), se observa una distribución transversal de velocidades relativamente homogénea, con máximos concentrados en la zona media del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 1.852 m/s. Hacia los márgenes, las velocidades disminuyen progresivamente hasta valores cercanos a 0 m/s, debido a la menor profundidad y al incremento de la fricción lateral asociada a la presencia de material rocoso. El campo vectorial (Figura 31) mantiene la dirección predominante del flujo sin alteraciones significativas, evidenciando un comportamiento hidráulico uniforme en la sección evaluada.

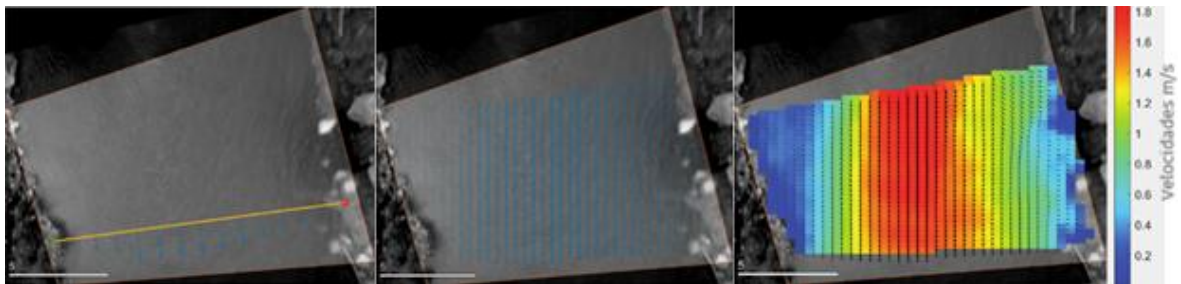


Figura 30 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s

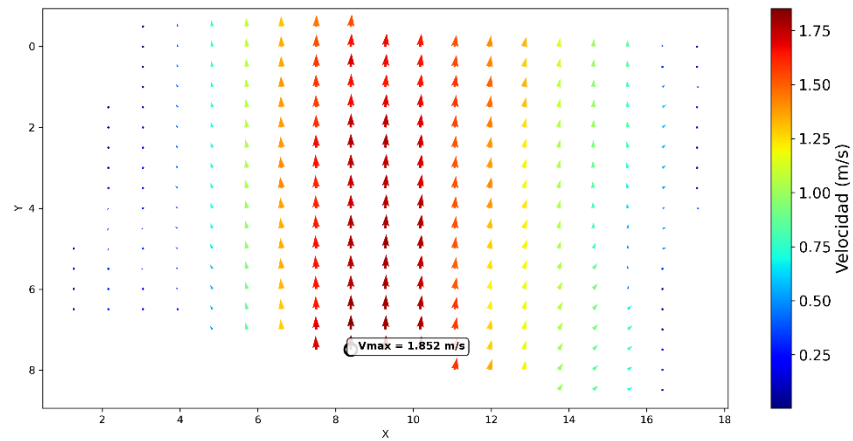


Figura 31 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

En la (Figura 32) el perfil de velocidades presenta un incremento gradual desde las márgenes hacia la zona central del cauce, hasta alcanzar una velocidad máxima de 1.76 m/s en la abscisa 7.73 m, coincidiendo con el sector de mayor concentración del flujo. Posteriormente, las magnitudes disminuyen progresivamente hacia el extremo opuesto de la sección. La integración de la distribución de velocidades con la geometría del perfil permitió estimar un caudal total de 9.512 m<sup>3</sup>/s para la sección analizada (Tabla 12).

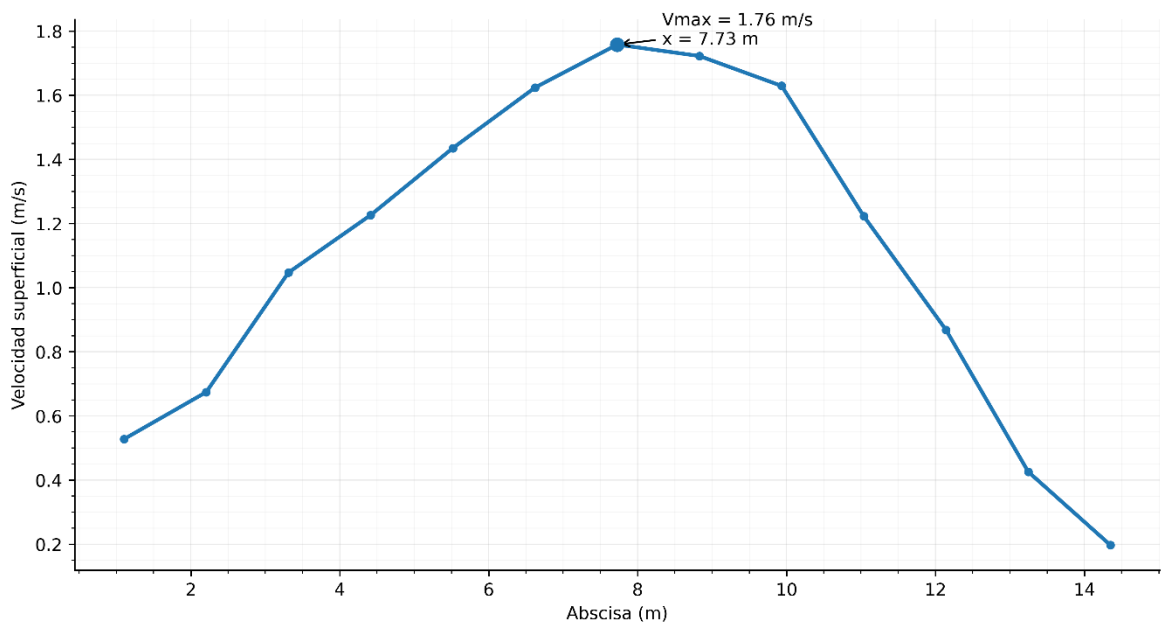


Figura 32 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 12 Velocidades y Caudales con LSPIV Segunda Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m <sup>3</sup> /s)
1,104	0,262	0,528	0,065
2,208	0,512	0,674	0,324
3,311	0,637	1,047	0,625
4,415	0,630	1,226	0,724
5,519	0,623	1,435	0,838
6,623	0,673	1,624	1,025
7,727	0,755	1,758	1,245
8,830	0,837	1,722	1,352
9,934	0,852	1,629	1,302
11,038	0,822	1,222	0,942
12,142	0,811	0,868	0,660
13,246	0,849	0,426	0,339
14,349	0,755	0,197	0,070
<b>TOTAL</b>			<b>9,512</b>

#### 4.2.2 Medición en el Rio Tarqui AJ Rio Yanuncay

La batimetría correspondiente a esta sección se presenta en la (Figura 33), donde se observa que la mayor profundidad se concentra hacia el izquierdo, alcanzando un valor máximo de 0.60 m. A demás de contar un ancho aproximado de 14.43 m. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.

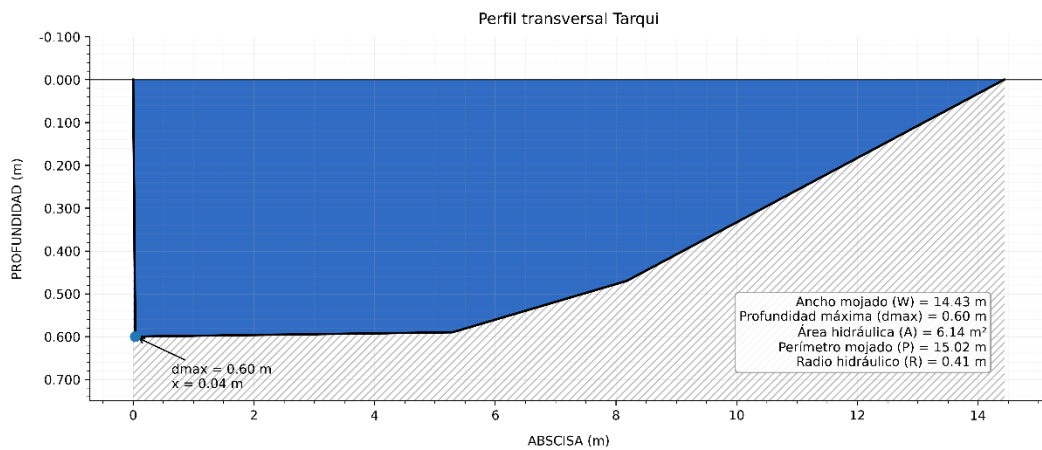
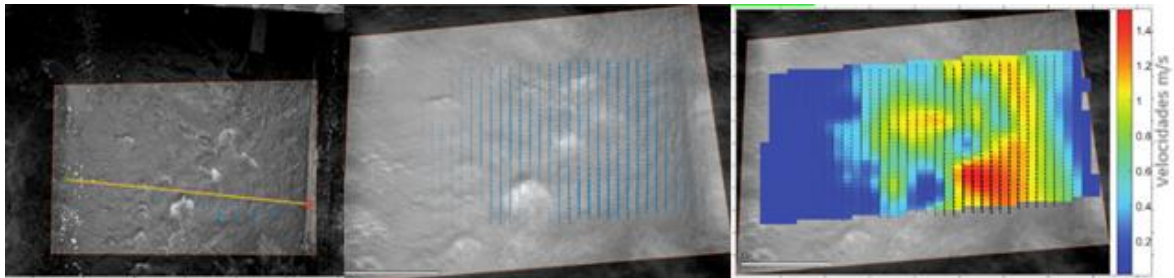


Figura 33 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

En la sección analizada (Figura 34), se presentan los campos de velocidad y el área de análisis, observándose una distribución no homogénea del flujo. Esta variabilidad se atribuye a la presencia de grandes piedras u obstáculos en el lecho, los cuales, aunque no se distinguen claramente en la imagen, generan perturbaciones locales y alteran la uniformidad de la velocidad.

Las mayores magnitudes se concentran en la zona lateral izquierda, donde la profundidad es mayor y el flujo presenta mejores condiciones de continuidad. En este sector (Figura 35) se registra una velocidad máxima de 1.514 m/s. En contraste, en las márgenes se presentan velocidades cercanas a 0 m/s en el margen derecho debido a la menor profundidad y la presencia de obstáculos, y en el margen izquierdo influenciado adicionalmente por la estructura del puente, que condiciona la dinámica del flujo.



*Figura 34 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s*

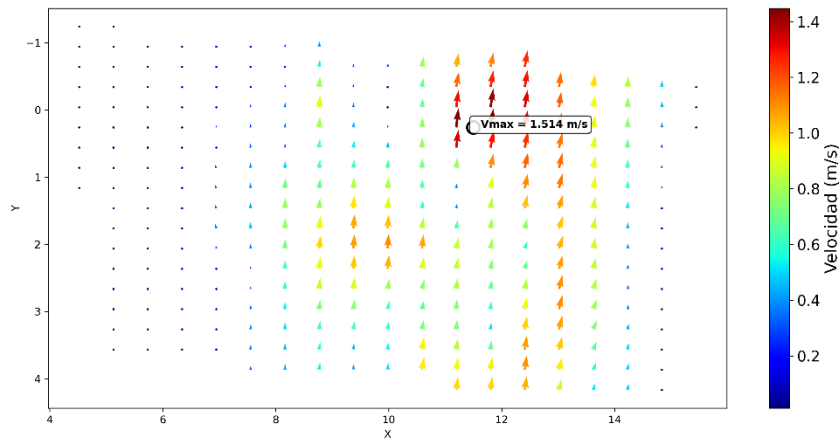


Figura 35 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

El perfil de velocidades superficiales (Figura 36), presenta una distribución asimétrica, con un incremento hacia la margen izquierda hasta alcanzar una velocidad máxima de 1.51 m/s en la abscisa 3.91 m. Posteriormente, las magnitudes disminuyen hacia la margen opuesta, con ligeras oscilaciones asociadas a irregularidades del lecho. La integración de la distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal de 3.257 m<sup>3</sup>/s para las condiciones registradas (Tabla 13).

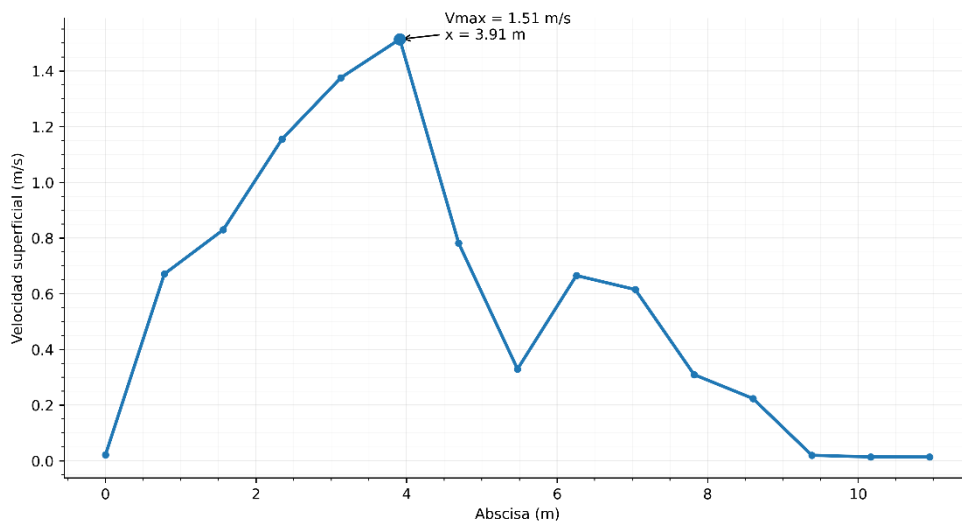


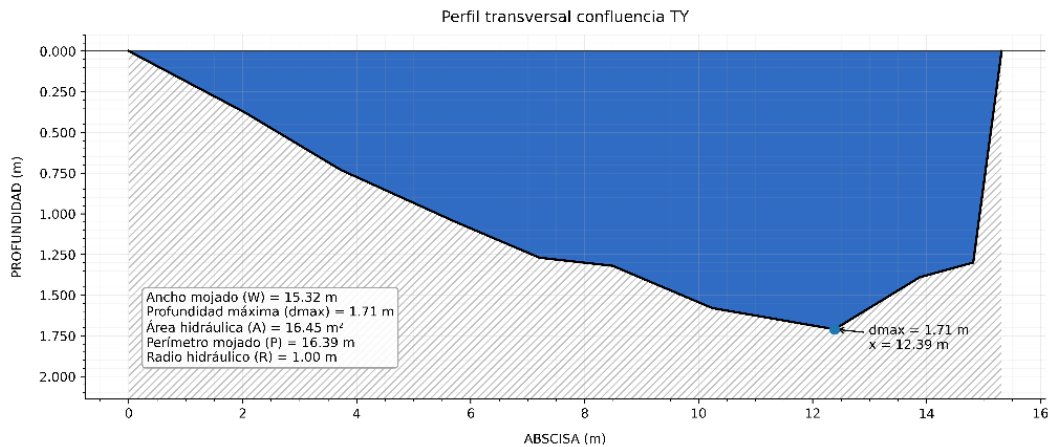
Figura 36 Perfil de velocidades Tarqui DJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 13 Velocidades y Caudales con LSPIV Segunda Campaña Tarqui (Fuente; Propia)

<b>Abscisa (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Velocidad con LSPIV (m/s)</b>	<b>Caudal con LSPIV (m<sup>3</sup>/s)</b>
0,000	0,000	0,021	0,000
0,782	0,599	0,671	0,267
1,564	0,597	0,829	0,329
2,346	0,596	1,155	0,457
3,128	0,594	1,376	0,543
3,911	0,593	1,514	0,596
4,693	0,591	0,782	0,307
5,475	0,582	0,329	0,128
6,257	0,550	0,665	0,243
7,039	0,517	0,615	0,212
7,821	0,485	0,309	0,100
8,603	0,438	0,224	0,065
9,385	0,379	0,020	0,005
10,167	0,321	0,014	0,003
10,950	0,262	0,014	0,001
<b>TOTAL</b>			<b>3,257</b>

#### 4.2.3 Medición en el Rio Yanuncay DJ Rio Tarqui

La batimetría correspondiente a la confluencia (Figura 37), presenta un ancho aproximado de 15.32 m y una profundidad máxima de 1.71 m, localizada hacia el margen derecho de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.



*Figura 37 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)*

En la sección evaluada (Figura 38), se muestran el área de análisis y los campos de velocidad superficial, donde se evidencia una distribución espacial irregular del flujo. Esta heterogeneidad está asociada a la presencia de material rocoso de gran tamaño en el lecho, que, aunque no sea claramente visible en la imagen, produce alteraciones locales y modifica el patrón uniforme de velocidades.

En el campo de velocidades (Figura 39) las mayores velocidades se localizan en el sector lateral izquierdo, coincidiendo con la zona de mayor tirante y mejor continuidad del flujo, donde se alcanza una velocidad máxima de 1.942 m/s. En contraste, hacia los extremos de la sección las magnitudes disminuyen hasta valores cercanos a 0 m/s. En el margen derecho, esta reducción se relaciona con la menor profundidad y la presencia de obstáculos.

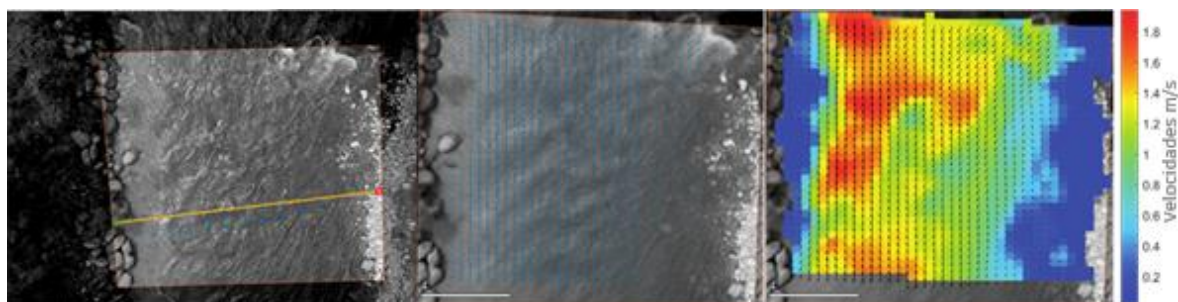


Figura 38 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s.

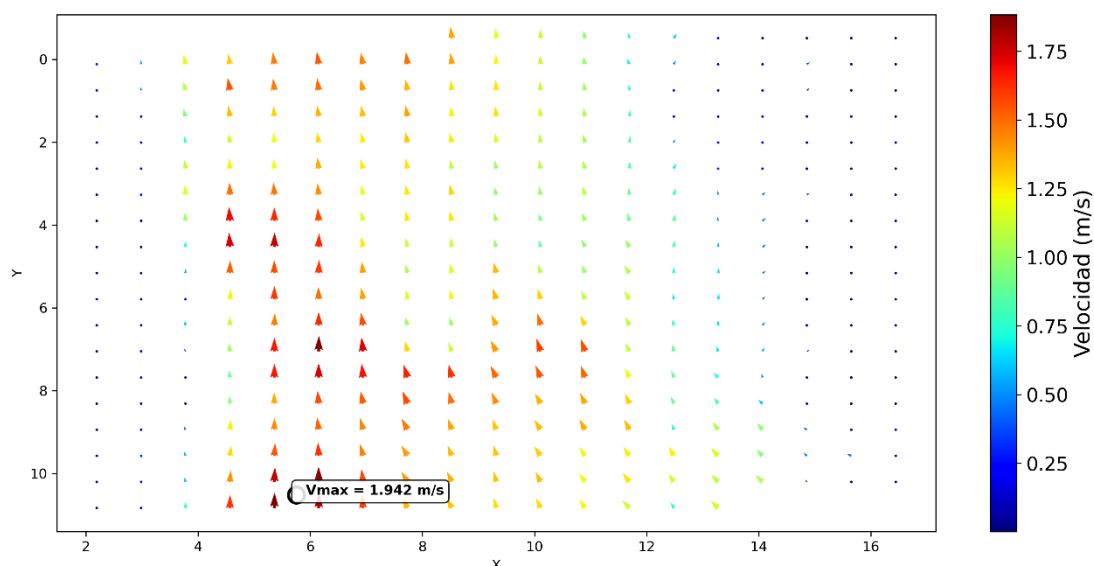


Figura 39 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente: Propia)

El perfil de velocidades superficiales (Figura 40), evidencia una distribución asimétrica, caracterizada por un incremento progresivo, aunque irregular, hacia la margen derecha, donde se registra una velocidad máxima de 1.38 m/s en la abscisa 9.13 m. A partir de este punto, las velocidades disminuyen hacia la margen opuesta, presentando ligeras fluctuaciones atribuibles a irregularidades del lecho y a variaciones locales en la morfología del cauce.

La integración de la distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal de 12.771 m<sup>3</sup>/s bajo las condiciones hidráulicas registradas. Este

valor mantiene una relación coherente y proporcional con el aporte conjunto de ambos ríos en la confluencia, lo que respalda la consistencia y confiabilidad de los datos obtenidos durante la campaña de medición (Tabla 14).

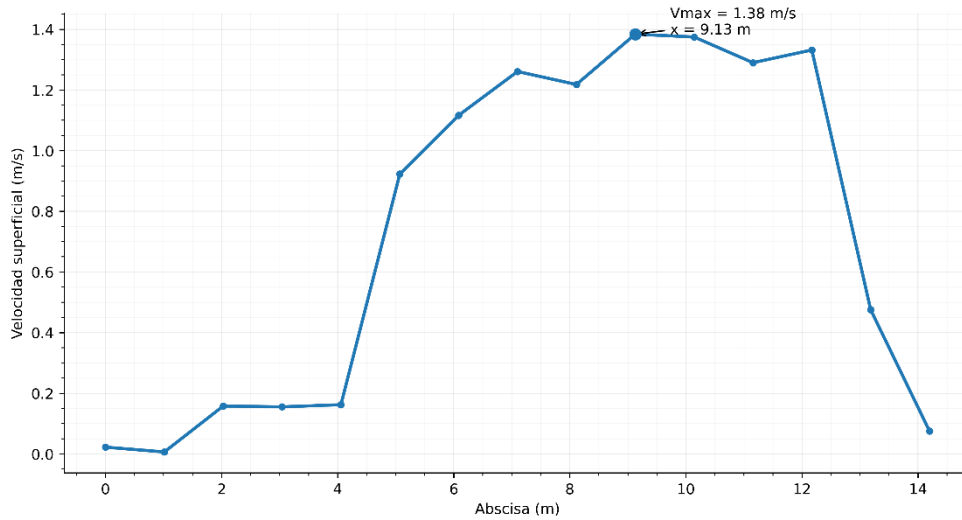


Figura 40 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente: Propia)

Tabla 14 Velocidades y Caudales con LSPIV Segunda Campaña Confluencia (Fuente: Propia)

<b>Abscisa (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Velocidad con LSPIV (m/s)</b>	<b>Caudal con LSPIV (m/s)</b>
0,000	0,000	0,022	0,000
1,014	0,188	0,006	0,001
2,028	0,376	0,158	0,051
3,043	0,588	0,155	0,079
4,057	0,784	0,162	0,110
5,071	0,945	0,923	0,752
6,085	1,102	1,117	1,061
7,099	1,254	1,261	1,363
8,113	1,305	1,218	1,371
9,128	1,415	1,384	1,688
10,142	1,565	1,375	1,855
11,156	1,635	1,290	1,819
12,170	1,697	1,332	1,949
13,184	1,539	0,475	0,630
14,198	1,359	0,075	0,044
<b>TOTAL</b>			<b>12,771</b>

#### 4.2.4 . Validación de resultados Segunda Campaña

La comparación entre los caudales estimados mediante la metodología LSPIV y los datos reportados por ETAPA EP muestra variaciones menores al 6 % en el río Yanuncay (5.57 %) y en la confluencia (1.27 %), lo que evidencia una adecuada concordancia entre ambos métodos. Estas bajas discrepancias se atribuyen a una distribución de velocidades relativamente uniforme y a la ausencia de perturbaciones significativas que afecten el procesamiento de las imágenes (Tabla 15).

*Tabla 15 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Segunda Campaña*

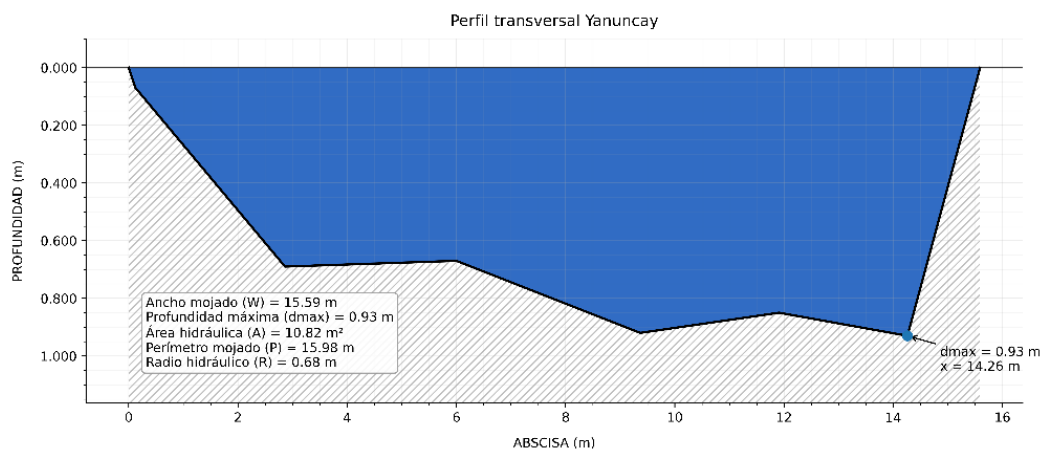
<b>Rio</b>	<b>Segunda Campaña</b>		
	<b>Etapa m3/s</b>	<b>LSPIV m3/s</b>	<b>Variación %</b>
<b>Yanuncay</b>	9,01	9,512	5,57
<b>Tarqui</b>	3,6	3,257	9,53
<b>Confluencia</b>	12,61	12,77	1,27

En contraste, el río Tarqui presenta una variación considerable del 9.53 %, la cual se asocia a la distribución irregular del campo de velocidades observada en la sección analizada. Como se muestra en la (Figura 35) correspondiente, las mayores velocidades no se concentran en el eje central del cauce, sino en sectores localizados, mientras que amplias zonas presentan velocidades bajas. Este comportamiento es característico de secciones con poca profundidad, presencia de turbulencia y efectos de fricción con el lecho, lo que altera la relación entre la velocidad superficial y la velocidad media. Estas condiciones influyen en la estimación del caudal mediante LSPIV, generando una mayor diferencia respecto a los valores de referencia.

### 4.3 Recolección de Datos de la Tercera Campaña

#### 4.3.1 Medición en el Río Yanuncay AJ Río Tarqui

La batimetría correspondiente a esta sección del río Yanuncay (Figura 41), presenta un ancho aproximado de 15.59 m y una profundidad máxima de 0.93 m, localizada hacia el margen derecho de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.



*Figura 41 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia)*

En la (Figura 42), se presenta el área y la sección transversal analizada, así como el campo vectorial a partir del cual se obtuvo la distribución de velocidades superficiales en el río Yanuncay durante la tercera campaña. El patrón (Figura 43) observado muestra un comportamiento relativamente uniforme, con mayores magnitudes concentradas en la zona central del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 1.838 m/s, evidenciando el desarrollo del eje principal del flujo en este sector. En contraste, las menores velocidades se localizan hacia ambas márgenes, debido a la menor profundidad relativa en estas zonas.

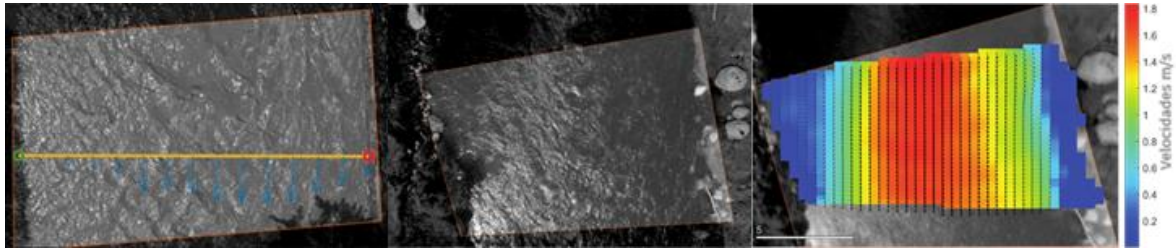


Figura 42 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s

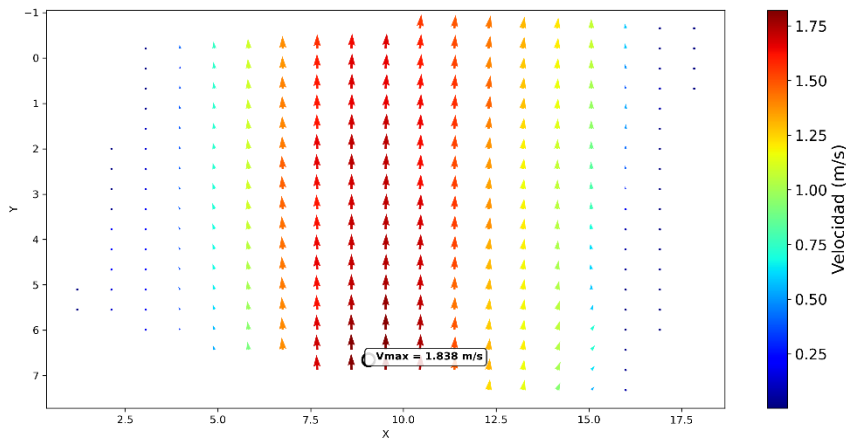


Figura 43 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente: Propia)

El perfil de velocidades superficiales (Figura 44), evidencia una distribución asimétrica, caracterizada por un incremento progresivo desde el margen izquierdo hacia la zona central del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 1.676 m/s, y posteriormente una disminución gradual hacia la margen opuesta. Esta variación presenta ligeras fluctuaciones asociadas a irregularidades del lecho y a cambios locales en la geometría de la sección, lo que influye en la redistribución transversal del flujo.

La integración de la distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal total de 10.428 m<sup>3</sup>/s bajo las condiciones hidráulicas registradas durante esta campaña. Este valor mantiene coherencia con la magnitud de las velocidades obtenidas y refleja una adecuada representatividad del comportamiento del flujo,

confirmando la confiabilidad de los datos medidos mediante la técnica LSPIV en el río Yanuncay (Tabla 16).

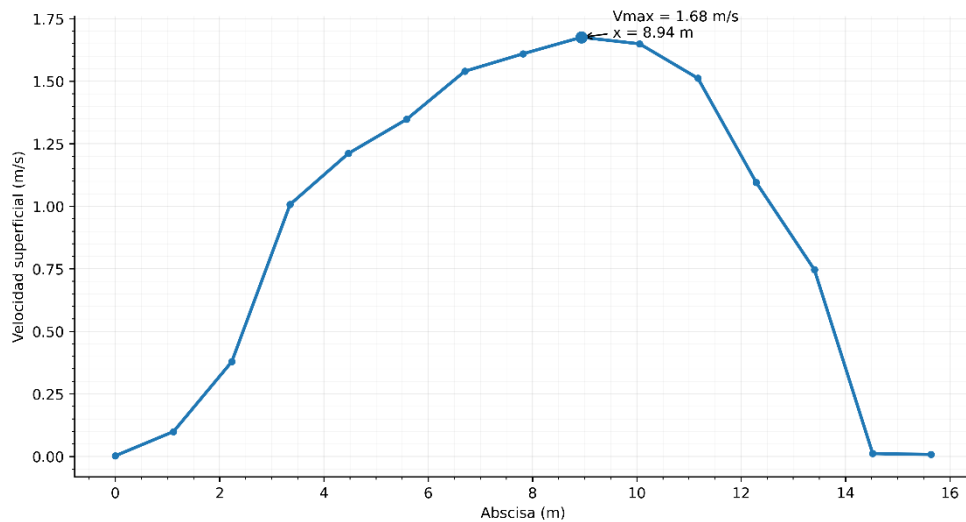


Figura 44 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente: Propia)

Tabla 16 Velocidades y Caudales con LSPIV Tercera Campaña Yanuncay (Fuente: Propia)

<b>Abscisa (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Velocidad con LSPIV (m/s)</b>	<b>Caudal con LSPIV (m<sup>3</sup>/s)</b>
0,000	0,000	0,002	0,000
1,117	0,295	0,099	0,028
2,234	0,548	0,379	0,197
3,351	0,687	1,007	0,657
4,468	0,680	1,211	0,782
5,586	0,673	1,347	0,861
6,703	0,722	1,540	1,056
7,820	0,805	1,610	1,231
8,937	0,888	1,676	1,413
10,054	0,901	1,649	1,411
11,171	0,870	1,512	1,249
12,288	0,863	1,096	0,898
13,405	0,901	0,746	0,638
14,522	0,746	0,012	0,008
15,639	0,000	0,008	0,000
<b>TOTAL</b>			<b>10,428</b>

### 4.3.2 Medición en el Río Tarqui AJ Río Yanuncay

La batimetría correspondiente a esta sección del río Tarqui (Figura 45), presenta un ancho aproximado de 15.70 m y una profundidad máxima de 0.70 m, localizada hacia el margen izquierdo de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.

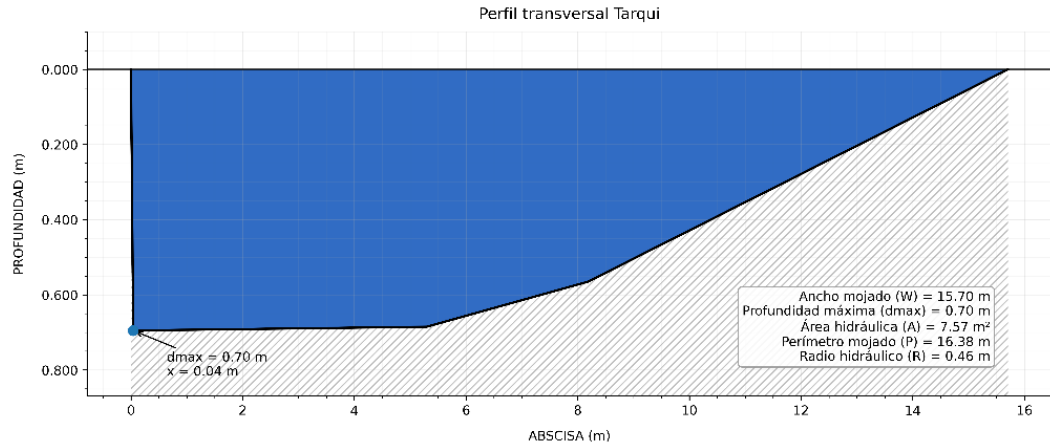
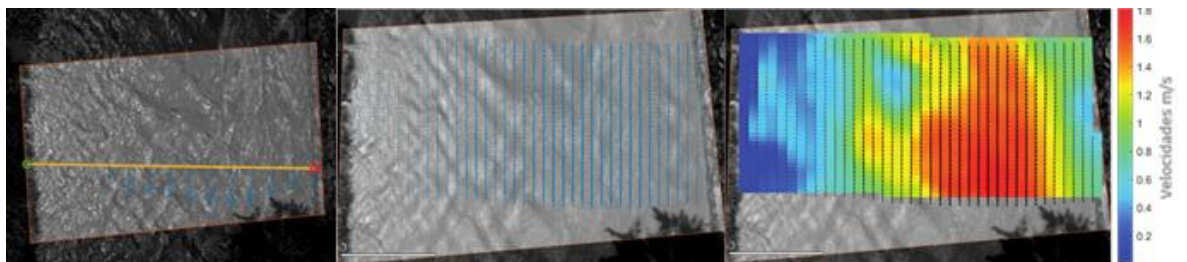
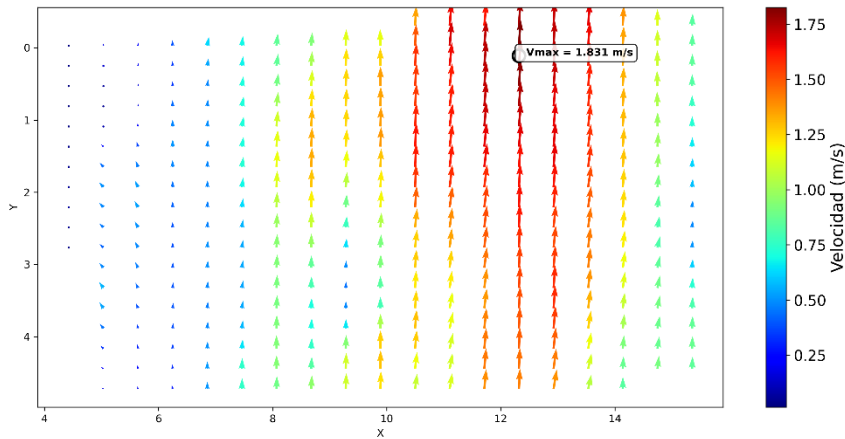


Figura 45 Batimetría en la sección Tarqui AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente: Propia)

En la (Figura 46), se presenta el área y la sección transversal analizada del río, así como el campo vectorial a partir del cual se obtuvo la distribución de velocidades superficiales. El modelo (Figura 47) observado muestra un comportamiento no homogéneo, con mayores magnitudes concentradas hacia la zona central derecha del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 1.831 m/s, evidenciando el desarrollo del eje principal del flujo en este sector. En contraste, las menores velocidades se localizan hacia el margen izquierdo, a la menor profundidad relativa en esta zona.



*Figura 46 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s*



*Figura 47 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Tercera Campaña) (Fuente; Propia)*

El perfil de velocidades superficiales (Figura 48), evidencia una distribución asimétrica, caracterizada por un incremento progresivo desde el margen izquierdo hacia la zona media del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 1.728 m/s, y posteriormente una disminución gradual hacia la margen derecha. Esta variación presenta ligeras fluctuaciones asociadas a irregularidades del lecho y a cambios en la geometría de la sección, lo que influye en la redistribución transversal del flujo.

La integración de la distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal total de 6.619 m<sup>3</sup>/s bajo las condiciones hidráulicas registradas durante esta campaña. Este valor refleja una adecuada correspondencia con las magnitudes de velocidad obtenidas y confirma la representatividad de los datos, evidenciando la influencia de la morfología del cauce en la distribución de las velocidades superficiales en el río Tarqui (Tabla 17).

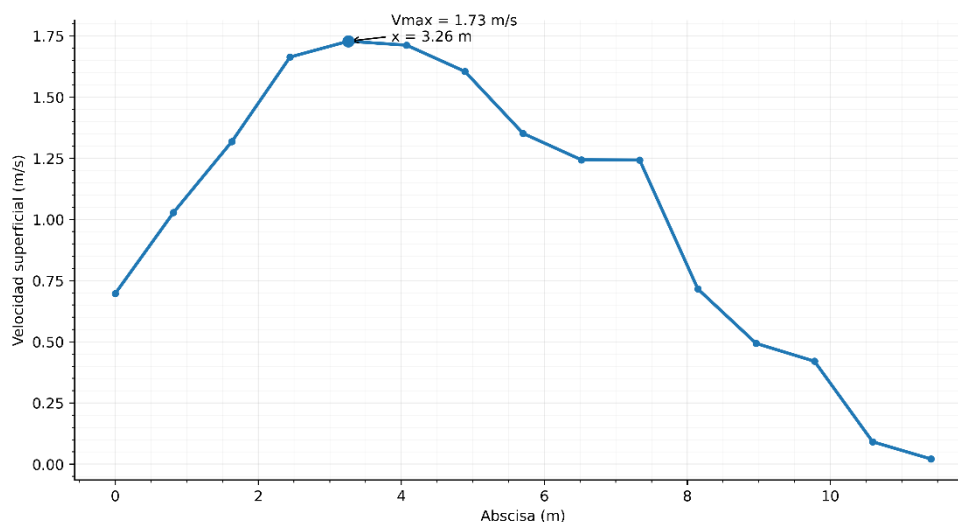


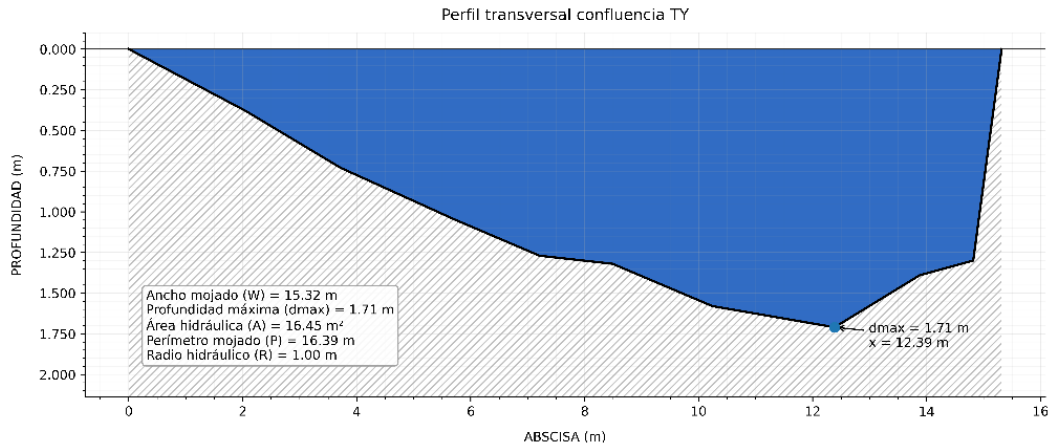
Figura 48 Perfil de velocidades Tarqui DJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 17 Velocidades y Caudales con LSPIV Tercera Campaña Tarqui (Fuente; Propia)

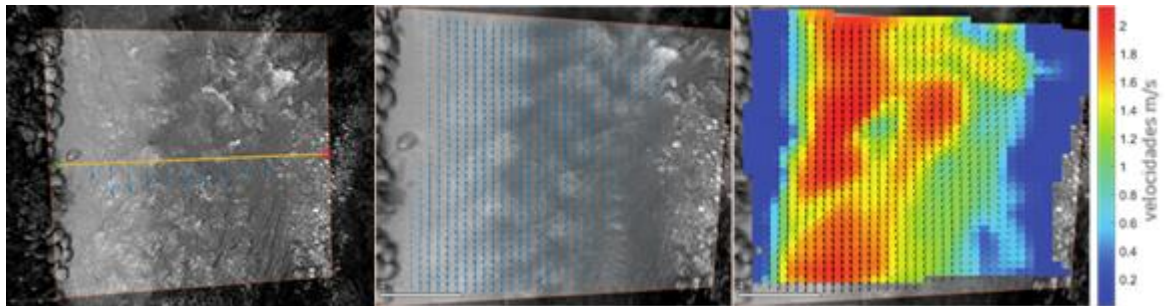
Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m <sup>3</sup> /s)
0,000	0,000	0,697	0,000
0,815	0,694	1,028	0,494
1,630	0,692	1,317	0,631
2,445	0,690	1,663	0,795
3,259	0,689	1,728	0,824
4,074	0,687	1,712	0,815
4,889	0,686	1,604	0,762
5,704	0,668	1,351	0,625
6,519	0,634	1,243	0,546
7,334	0,600	1,242	0,517
8,149	0,566	0,715	0,281
8,963	0,506	0,493	0,173
9,778	0,445	0,420	0,130
10,593	0,384	0,091	0,024
11,408	0,323	0,021	0,002
<b>TOTAL</b>			<b>6,619</b>

### 4.3.3 Medición en Rio Yanuncay DJ Rio Tarqui

La batimetría correspondiente a la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay (Figura 49), presenta un ancho aproximado de 15.32 m y una profundidad máxima de 1.71 m, localizada hacia el margen derecho de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.



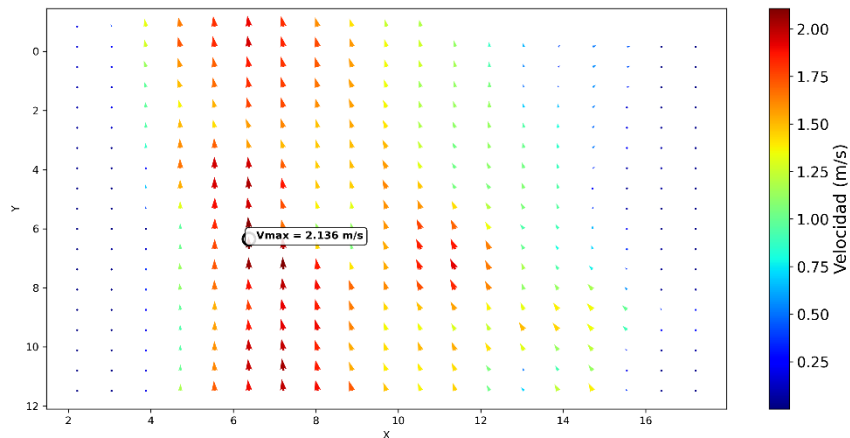
*Figura 49 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia)*



*Figura 50 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s*

En la (Figura 50), correspondiente se presenta el área y la sección transversal analizada en la confluencia de los ríos, así como el campo vectorial a partir del cual se obtuvo la distribución de velocidades superficiales. El modelo (Figura 51) observado muestra un comportamiento no homogéneo, con mayores magnitudes concentradas en la zona central del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 2.136 m/s, evidenciando el desarrollo

del eje principal del flujo en este sector. Hacia ambos márgenes, las velocidades disminuyen progresivamente hasta valores cercanos a 0 m/s, debido a la menor profundidad relativa.



*Figura 51 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente: Propia)*

El perfil de velocidades superficiales (Figura 52), evidencia una distribución asimétrica, caracterizada por un incremento progresivo desde el margen izquierdo hacia la zona media del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 1.894 m/s, y posteriormente una disminución abrupta hacia la margen derecha. Esta variación presenta oscilaciones intermedias asociadas a cambios en la profundidad y a la interacción de los flujos en la confluencia, lo que influye en la redistribución transversal del flujo.

La integración de la distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal total de 17.806 m<sup>3</sup>/s bajo las condiciones hidráulicas registradas durante esta campaña. Este valor guarda coherencia con las magnitudes de velocidad obtenidas y refleja el efecto combinado de ambos cauces en la dinámica del flujo, confirmando la representatividad y confiabilidad de los resultados obtenidos (Tabla 18).

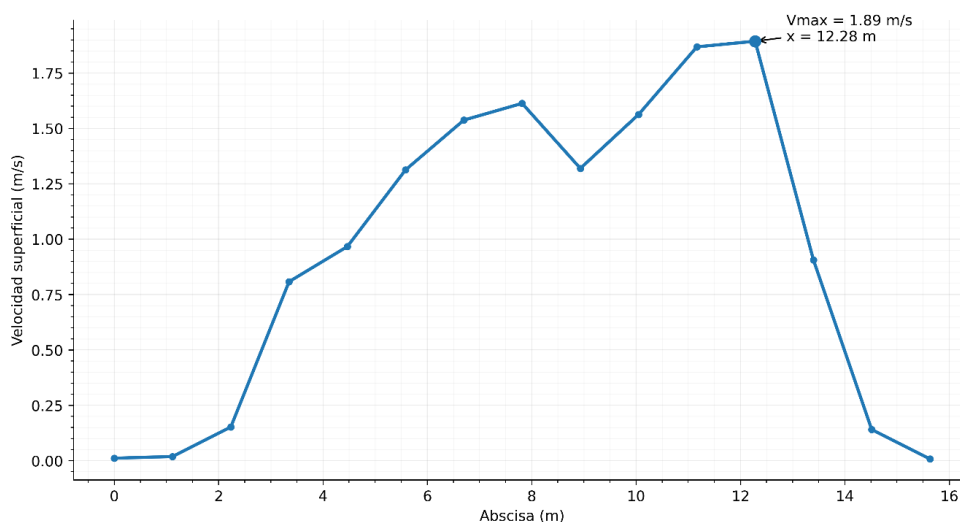


Figura 52. Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente: Propia)

Tabla 18 Velocidades y Caudales con LSPIV Tercera Campaña Confluencia (Fuente: Propia)

<b>Abscisa (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Velocidad con LSPIV (m/s)</b>	<b>Caudal con LSPIV (m/s)</b>
0,000	0,000	0,011	0,000
1,117	0,207	0,019	0,004
2,233	0,418	0,152	0,060
3,350	0,653	0,808	0,500
4,466	0,849	0,966	0,779
5,583	1,026	1,313	1,279
6,699	1,194	1,538	1,743
7,816	1,294	1,613	1,981
8,933	1,386	1,319	1,735
10,049	1,551	1,563	2,302
11,166	1,636	1,868	2,901
12,282	1,704	1,894	3,062
13,399	1,493	0,906	1,284
14,515	1,329	0,141	0,177
15,632	0,000	0,008	0,000
<b>TOTAL</b>			<b>17,806</b>

#### 4.3.4 . Validación de resultados Tercera Campaña

Los caudales estimados mediante la metodología LSPIV presentan una alta concordancia con los valores reportados por ETAPA EP, registrándose variaciones inferiores al 6% en todas las secciones evaluadas durante la tercera campaña, lo que confirma

la confiabilidad del método bajo las condiciones analizadas. En el río Yanuncay se obtuvo una variación de 3.45 %, en el río Tarqui de 4.78 % y en la confluencia de 4.55 %, valores que se encuentran dentro de rangos aceptables para este tipo de mediciones (Tabla 19).

Estas bajas discrepancias se atribuyen principalmente a que, durante esta campaña, los campos de velocidad superficial no presentaron perturbaciones significativas, evidenciando una distribución transversal relativamente uniforme y parcialmente homogénea. Esta condición favorece una relación más representativa entre la velocidad superficial y la velocidad media del flujo, mejorando la precisión en la estimación del caudal mediante LSPIV. Asimismo, la ausencia de zonas con turbulencia intensa, recirculaciones o cambios bruscos de profundidad contribuyó a una mejor definición del eje principal del flujo, reduciendo las incertidumbres en el procesamiento y validación de los resultados.

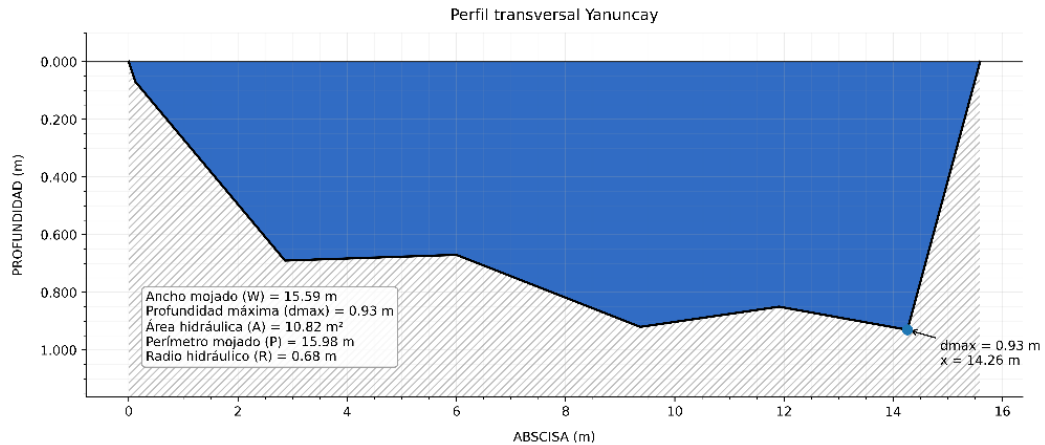
*Tabla 19 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Tercera Campaña*

<b>Tercera Campaña</b>			
<b>Rio</b>	<b>Etapa m3/s</b>	<b>LSPIV m3/s</b>	<b>Variación %</b>
<b>Yanuncay</b>	10,08	10,428	3,45
<b>Tarqui</b>	6,95	6,618	4,78
<b>Confluencia</b>	17,03	17,805	4,55

#### **4.4 Recolección de Datos de la Cuarta Campaña**

##### **4.4.1 Medición en el Río Yanuncay AJ Río Tarqui**

La batimetría correspondiente a esta sección del río Yanuncay (Figura 53), presenta un ancho aproximado de 15.59 m y una profundidad máxima de 0.93 m, localizada hacia el margen derecho de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.



*Figura 53 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia)*

En la sección analizada del río Yanuncay (Figura 54), se presentan el área de análisis y los campos de velocidad (Figura 55), observándose una distribución no homogénea del flujo, con una clara concentración de las mayores magnitudes en la zona central de la sección. Este comportamiento se relaciona a la mayor continuidad del flujo en este sector, donde se registra una velocidad máxima de 1.589 m/s, confirmando la presencia del eje hidráulico principal. En contraste, hacia los márgenes izquierdo y derecho las velocidades disminuyen progresivamente, alcanzando valores cercanos a 0 m/s, debido a la menor profundidad y al incremento de la fricción lateral, lo que reduce la contribución al caudal en estas zonas. Esta distribución evidencia que el flujo concentra su mayor capacidad de transporte en la parte media del cauce, donde la geometría de la sección controla directamente la dinámica y la distribución transversal de las velocidades.

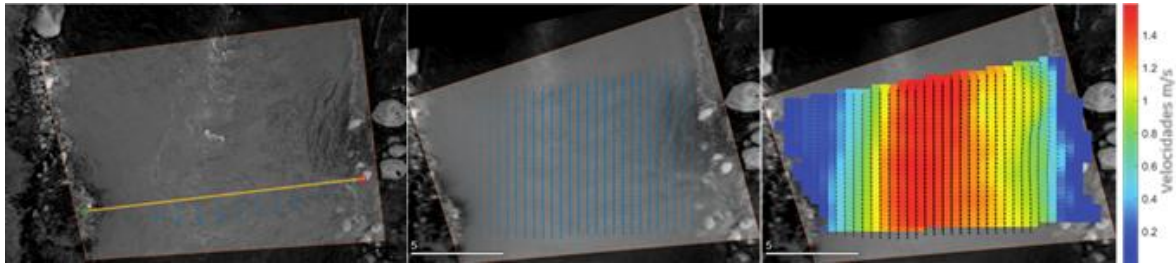


Figura 54 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s

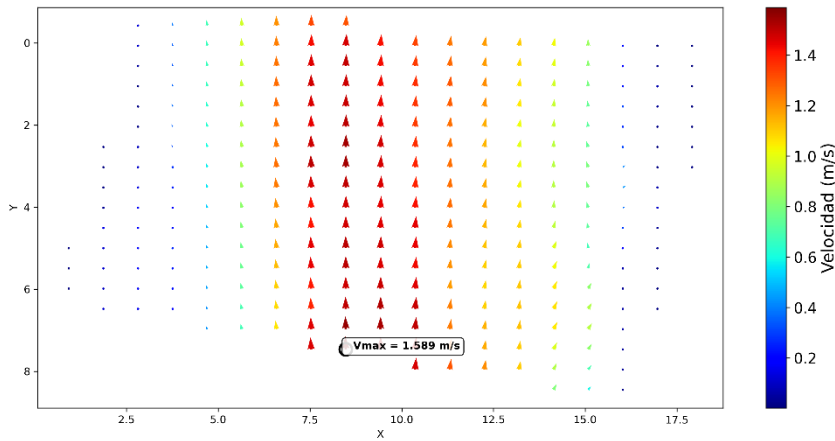


Figura 55 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente: Propia)

El perfil de velocidades superficiales (Figura 56), evidencia una distribución asimétrica, caracterizada por un incremento progresivo desde el margen izquierdo hacia la zona central del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 1.502 m/s, y posteriormente una disminución gradual hacia la margen derecha. Esta variación presenta ligeras fluctuaciones asociadas a cambios en la profundidad y a la geometría del lecho, lo que influye en la redistribución transversal del flujo.

La integración de la distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal total de 9.147 m<sup>3</sup>/s bajo las condiciones hidráulicas registradas durante esta campaña. Este valor refleja una adecuada correspondencia con las magnitudes

de velocidad obtenidas y confirma la representatividad de los resultados, evidenciando la influencia de la morfología del cauce en la dinámica hidráulica del río Yanuncay (Tabla 20).

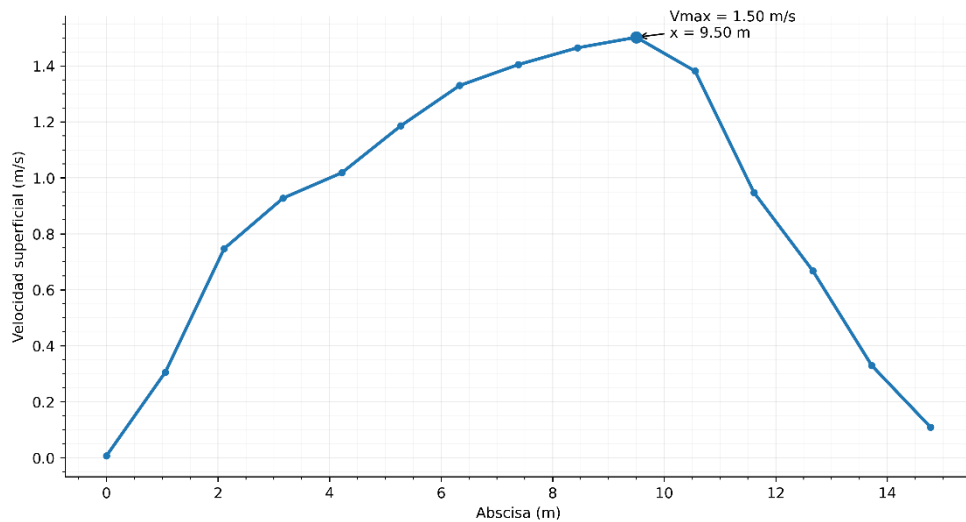


Figura 56 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 20 Velocidades y Caudales con LSPIV Cuarta Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)

<b>Abscisa (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Velocidad con LSPIV (m/s)</b>	<b>Caudal con LSPIV (m/s)</b>
0,000	0,000	0,007	0,000
1,055	0,281	0,306	0,077
2,111	0,520	0,747	0,349
3,166	0,688	0,928	0,573
4,222	0,681	1,018	0,623
5,277	0,675	1,186	0,718
6,333	0,695	1,330	0,829
7,388	0,773	1,405	0,974
8,444	0,851	1,464	1,119
9,499	0,916	1,502	1,235
10,555	0,887	1,381	1,100
11,610	0,858	0,948	0,730
12,666	0,876	0,668	0,525
13,721	0,912	0,330	0,270
14,777	0,568	0,110	0,028
<b>TOTAL</b>			<b>9,147</b>

#### 4.4.2 Medición en el Río Tarqui AJ Río Yanuncay

La batimetría correspondiente a esta sección del río Tarqui (Figura 57), presenta un ancho aproximado de 14.70 m y una profundidad máxima de 0.62 m, localizada hacia el margen izquierdo de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.

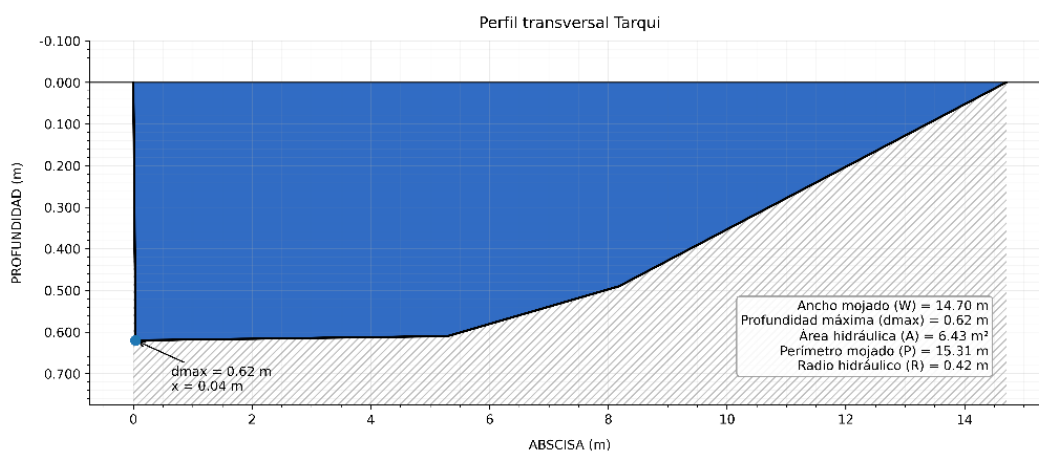
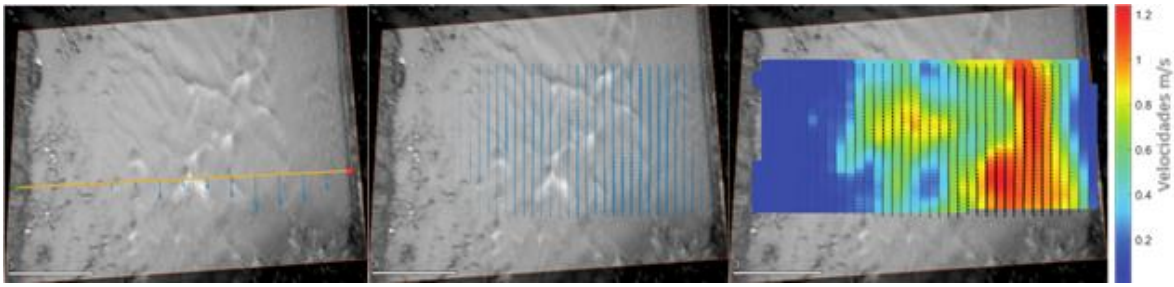
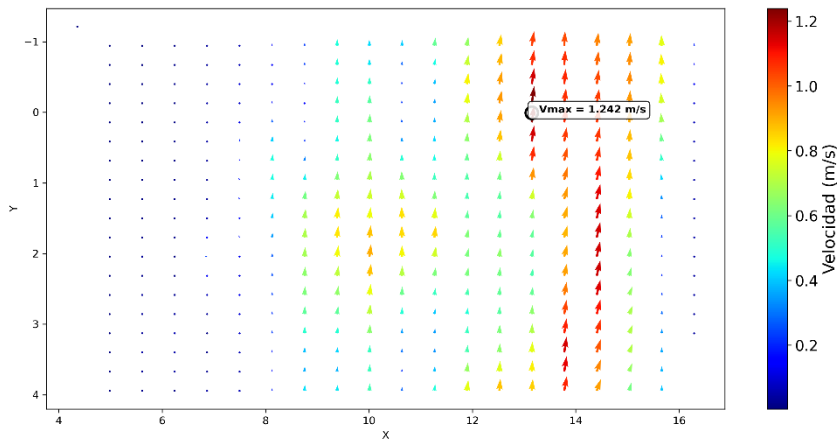


Figura 57 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente: Propia)

En la sección analizada del río Tarqui (Figura 58), se presentan el área de análisis y los campos de velocidad (Figura 59), observándose una distribución no homogénea del flujo, con una concentración de las mayores magnitudes hacia la zona lateral-derecha de la sección. Este comportamiento se relaciona con la mayor continuidad del flujo en este sector, donde se registra una velocidad máxima de 1.242 m/s, confirmando la presencia del eje hidráulico principal. En contraste, hacia el margen izquierdo las velocidades disminuyen considerablemente, alcanzando valores cercanos a 0 m/s, debido a la menor profundidad y al incremento de la fricción lateral, lo que reduce la capacidad de transporte en esta zona.



*Figura 58 Sección de control (Superior Izquierda), Campo de velocidad vectorial (Superior Derecha), y Campo de velocidad promedio (Inferior) Tarqui AJ Yanuncay en m/s*



*Figura 59 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia)*

El perfil de velocidades superficiales (Figura 60), evidencia una distribución asimétrica, caracterizada por un incremento progresivo desde el margen izquierdo hacia la zona media del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 1.22 m/s, y posteriormente una disminución gradual hacia la margen derecha. Esta variación presenta cambios asociados a la geometría de la sección y a la menor profundidad hacia los extremos, lo que influye en la redistribución transversal del flujo.

La integración de la distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal total de 2.708 m<sup>3</sup>/s bajo las condiciones hidráulicas registradas durante esta campaña. Este valor refleja una menor capacidad de transporte en comparación

con campañas anteriores, evidenciando la influencia de las condiciones hidráulicas y morfológicas del cauce en la dinámica del flujo (Tabla 21).

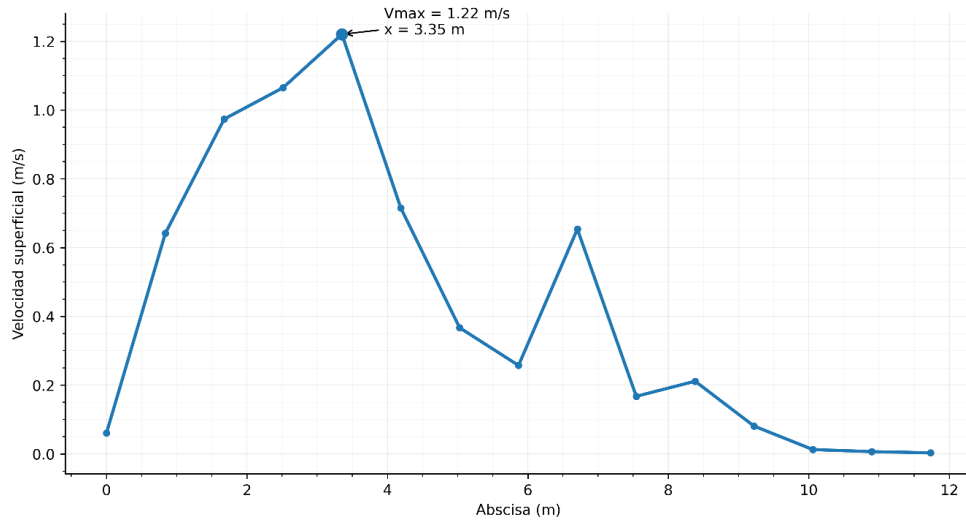


Figura 60 Perfil de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia)

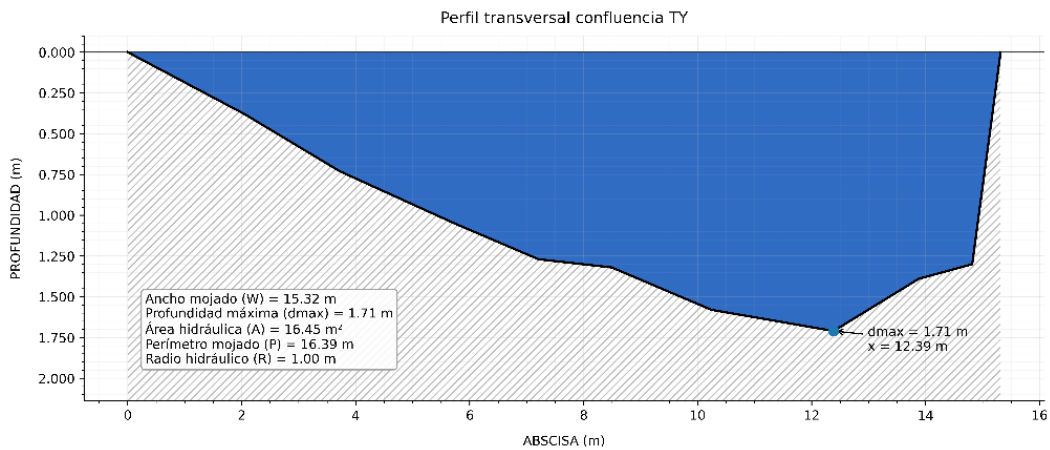
Tabla 21 Velocidades y Caudales con LSPIV Cuarta Campaña Tarqui (Fuente; Propia)

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m <sup>3</sup> /s)
0,000	0,000	0,061	0,000
0,838	0,618	0,641	0,283
1,676	0,617	0,974	0,428
2,514	0,615	1,065	0,467
3,353	0,614	1,220	0,534
4,191	0,612	0,715	0,312
5,029	0,610	0,367	0,160
5,867	0,586	0,257	0,107
6,705	0,551	0,654	0,257
7,543	0,516	0,167	0,062
8,381	0,475	0,211	0,071
9,220	0,412	0,081	0,024
10,058	0,349	0,013	0,003
10,896	0,286	0,007	0,001
11,734	0,223	0,003	0,000
<b>TOTAL</b>			<b>2,708</b>

#### 4.4.3 Medición en Río Yanuncay DJ Río Tarqui

La batimetría correspondiente a la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay Figura 61, presenta un ancho aproximado de 15.32 m y una profundidad máxima de 1.71 m,

localizada hacia el margen derecho de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.



*Figura 61 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente: Propia)*

En la sección analizada en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay (Figura 62), se presentan el área de análisis y los campos de velocidad (Figura 63) y, observándose una distribución no homogénea del flujo, con una clara concentración de las mayores magnitudes hacia la zona central-izquierda de la sección. Este comportamiento se relaciona con la mayor continuidad y profundidad del flujo en este sector, donde se registra una velocidad máxima de 2.006 m/s, confirmando la presencia del eje hidráulico principal. En contraste, hacia el margen derecho las velocidades disminuyen progresivamente hasta valores cercanos a 0 m/s, debido a la menor profundidad y al incremento de la fricción lateral, lo que reduce la capacidad de transporte en esta zona. Esta distribución evidencia que el flujo concentra su mayor capacidad de transporte en la parte media del cauce, mientras que los extremos presentan menor eficiencia hidráulica, reflejando la influencia directa de la geometría de la sección en la dinámica y la distribución transversal de las velocidades durante esta campaña.

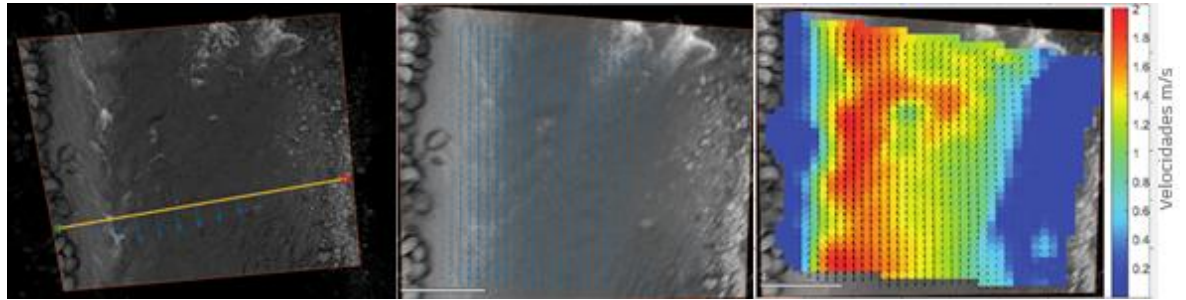


Figura 62. Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s

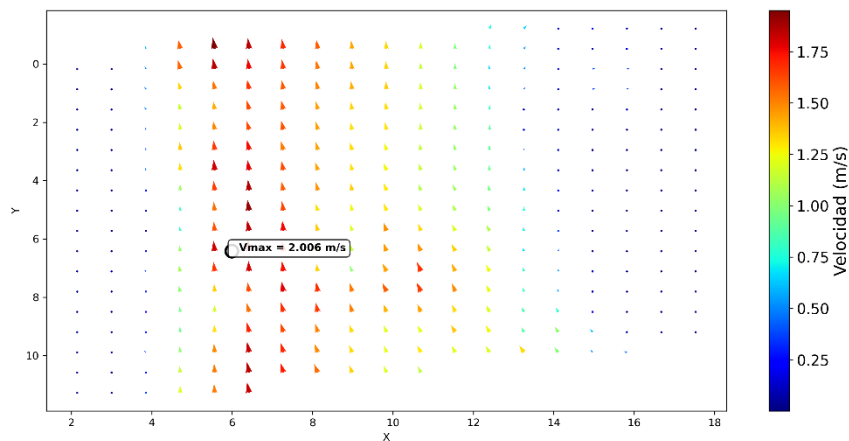


Figura 63 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente: Propia)

El perfil de velocidades superficiales (Figura 64), evidencia una distribución asimétrica, caracterizada por un incremento progresivo desde el margen izquierdo hacia la zona central del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 1.622 m/s, y posteriormente una disminución gradual hacia la margen derecha. Esta variación presenta fluctuaciones asociadas a la interacción de los flujos en la confluencia y a las variaciones en la profundidad de la sección, lo que influye en la redistribución transversal del flujo.

La integración de la distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal total de 14.490 m<sup>3</sup>/s bajo las condiciones hidráulicas registradas durante esta campaña. Este valor evidencia la influencia directa de la confluencia de ambos

ríos en la dinámica del flujo, reflejando una adecuada correspondencia entre la distribución de velocidades y el comportamiento hidráulico del sistema (Tabla 22).

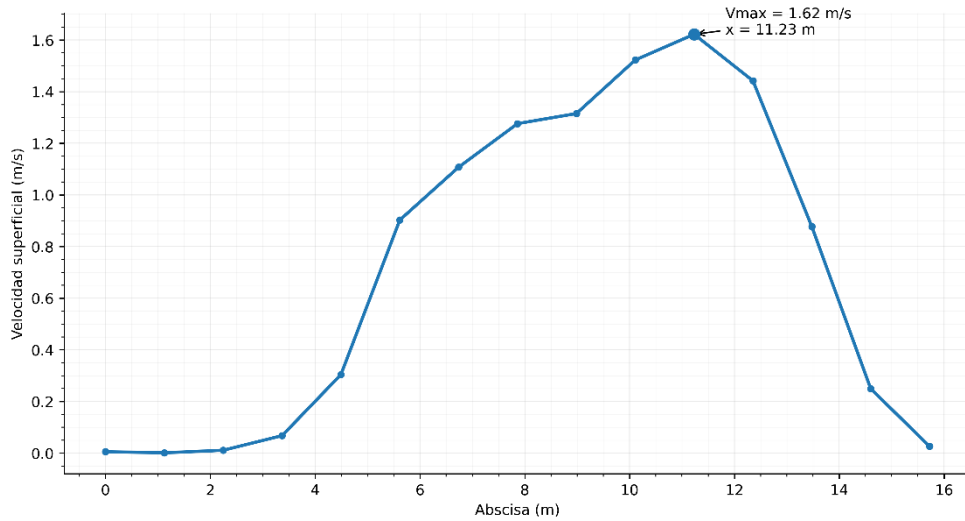


Figura 64 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 22 Velocidades y Caudales con LSPIV Cuarta Campaña Confluencia (Fuente; Propia)

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m/s)
0,000	0,000	0,005	0,000
1,123	0,208	0,001	0,000
2,246	0,421	0,011	0,004
3,369	0,657	0,068	0,042
4,492	0,853	0,304	0,248
5,615	1,031	0,903	0,889
6,738	1,200	1,108	1,269
7,862	1,295	1,276	1,578
8,985	1,393	1,315	1,749
10,108	1,560	1,523	2,268
11,231	1,640	1,622	2,540
12,354	1,708	1,442	2,351
13,477	1,476	0,877	1,236
14,600	1,321	0,250	0,315
15,723	0,000	0,026	0,000
<b>TOTAL</b>			<b>14,490</b>

#### 4.4.4 . Validación de resultados Cuarta Campaña

Los resultados de la cuarta campaña muestran un comportamiento consistente con lo observado en campañas anteriores, donde el río Yanuncay y la confluencia presentan variaciones relativamente bajas, de 4.70 % y 1.26 %, respectivamente, evidenciando una buena concordancia entre los caudales estimados mediante LSPIV y los reportados por ETAPA EP. Estas diferencias se encuentran dentro de rangos aceptables y reflejan condiciones de flujo con una distribución de velocidades superficial relativamente uniforme, lo que favorece una estimación representativa del caudal (Tabla 23).

*Tabla 23 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Cuarta Campaña*

<b>Rio</b>	<b>Cuarta Campaña</b>		
	Etapa m3/s	LSPIV m3/s	Variación %
<b>Yanuncay</b>	8,73	9,14	4,70
<b>Tarqui</b>	5,58	2,708	51,47
<b>Confluencia</b>	14,31	14,49	1,26

En contraste, el río Tarqui presenta una variación significativa de 51.47 %, constituyendo la discrepancia más alta registrada durante las campañas de medición. Este comportamiento atípico que se atribuye principalmente a la distribución irregular del campo de velocidades, influenciada por la presencia de elementos del lecho, como rocas y zonas de baja profundidad, que generan turbulencia, recirculaciones y una reducción localizada de las velocidades superficiales. Estas condiciones alteran la relación entre la velocidad superficial y la velocidad media de la sección, afectando la precisión del método LSPIV en la estimación del caudal. Adicionalmente, la menor profundidad hidráulica observada en esta sección incrementa el efecto de la fricción del lecho, contribuyendo a una mayor heterogeneidad del flujo y, por ende, a una mayor variación respecto a los valores de referencia. Adicionalmente, posibles errores en la obtención de datos, asociados a condiciones de iluminación, ruido o movimientos del dron, también pudieron influir en la discrepancia observada.

## 4.5 Recolección de Datos de la Quinta Campaña

### 4.5.1 Medición en el Rio Yanuncay AJ Tarqui

La batimetría mostrada en la (Figura 65), correspondiente presenta un ancho de 17.26 m y una profundidad máxima de 1.45 m. El perfil transversal evidencia una geometría irregular, donde la mayor profundidad se localiza hacia el margen derecho, alcanzando el valor máximo registrado en la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.

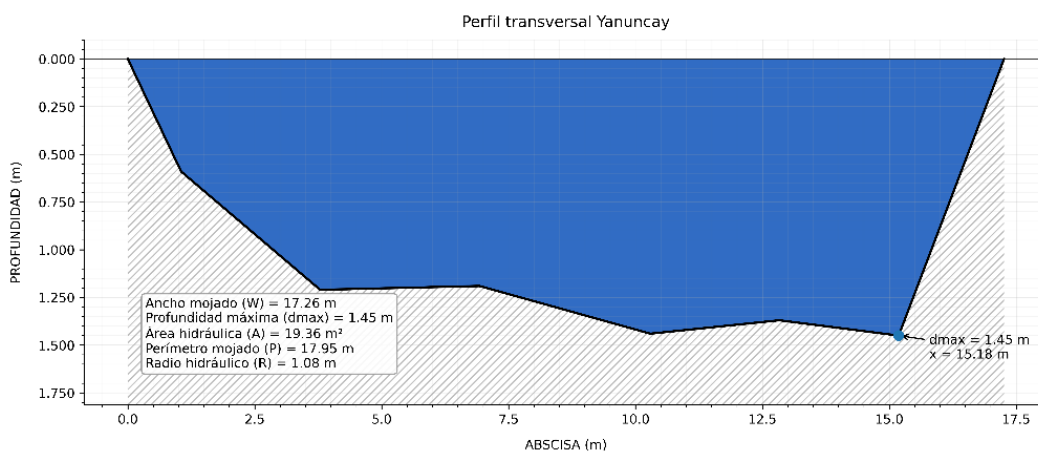


Figura 65 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia)

En la (Figura 66), correspondiente se presenta el área y la sección transversal analizada, así como el campo vectorial a partir del cual se obtuvo la distribución de velocidades superficiales (Figura 67). El patrón observado muestra un comportamiento relativamente homogéneo, con mayores magnitudes concentradas en la zona central del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 3.089 m/s. En contraste, las menores velocidades se localizan en las márgenes, debido al efecto de fricción lateral y la menor profundidad. Durante el levantamiento no se identificaron obstáculos significativos que afectaran el procesamiento de imágenes ni la obtención de datos, lo que favoreció la calidad y confiabilidad de los resultados.

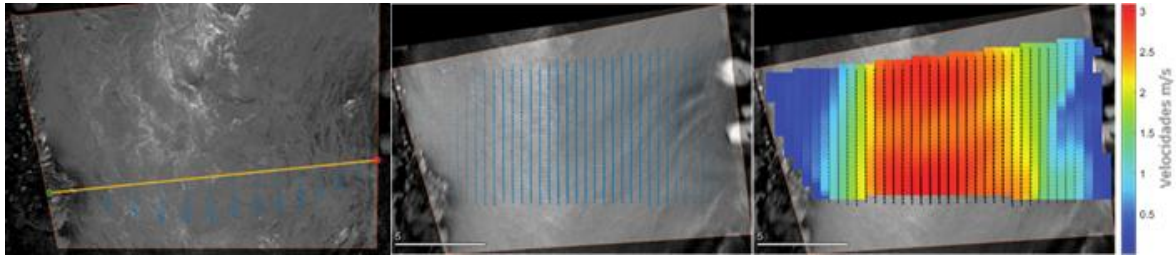


Figura 66 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s

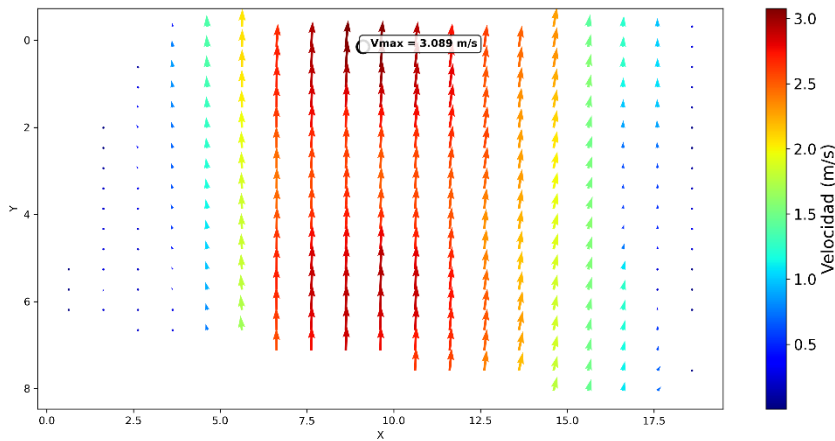


Figura 67 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente: Propia)

El perfil transversal de velocidades (Figura 68) mantiene un incremento irregular hacia la zona media- derecha hasta alcanzar su velocidad máxima 3 m/s dando como resultado de esta distribución transversal, el caudal total alcanzó 34.917 m<sup>3</sup>/s, constituyéndose en el valor más alto registrado durante las campañas de medición, condición asociada al incremento del volumen de escorrentía producto de las precipitaciones previas. Posteriormente, la reducción de las condiciones de escorrentía provocó una disminución progresiva del caudal en las campañas siguientes, evidenciando la influencia directa de los factores climáticos en la dinámica hidráulica del río (Tabla 24).

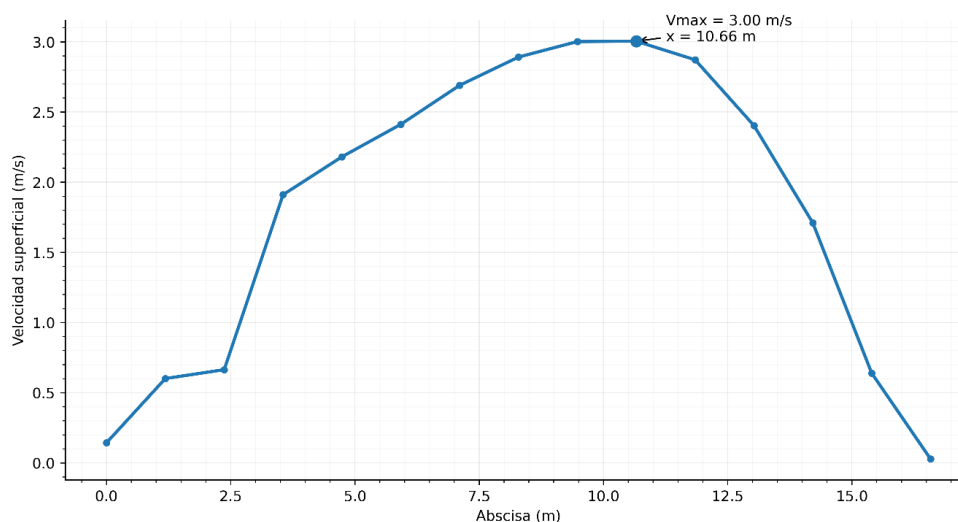


Figura 68 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia)

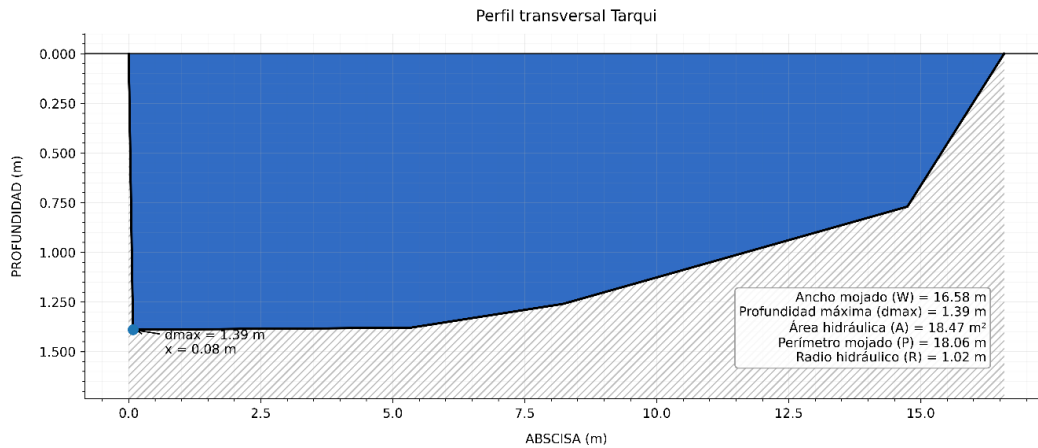
Tabla 24 Velocidades y Caudales con LSPIV Quinta Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)

<b>Abscisa (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Velocidad con LSPIV (m/s)</b>	<b>Caudal con LSPIV (m/s)</b>
0,000	0,000	0,143	0,000
1,185	0,620	0,601	0,376
2,369	0,889	0,664	0,595
3,554	1,157	1,911	2,226
4,738	1,204	2,181	2,644
5,923	1,196	2,412	2,906
7,107	1,203	2,690	3,260
8,292	1,291	2,892	3,760
9,476	1,379	3,002	4,169
10,661	1,430	3,005	4,326
11,845	1,397	2,872	4,041
13,030	1,377	2,404	3,332
14,215	1,417	1,710	2,440
15,399	1,300	0,640	0,837
16,584	0,472	0,028	0,007
<b>TOTAL</b>			<b>34,917</b>

#### 4.5.2 Medición en el Rio Tarqui AJ Rio Yanuncay

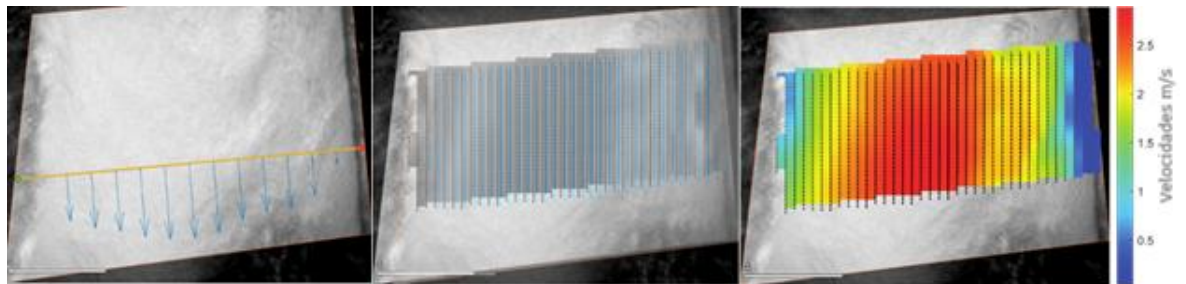
La batimetría correspondiente a esta sección se presenta en la (Figura 69), donde se observa que la mayor profundidad se concentra hacia el margen izquierdo, alcanzando un valor máximo de 1.39 m, lo que evidencia el desplazamiento del eje principal del flujo hacia este sector. Además, la sección presenta un ancho mojado de 16.58 m. La vista del perfil

está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo, observándose una pendiente ascendente hacia el margen derecho, donde las menores profundidades influyen en la distribución transversal del flujo.

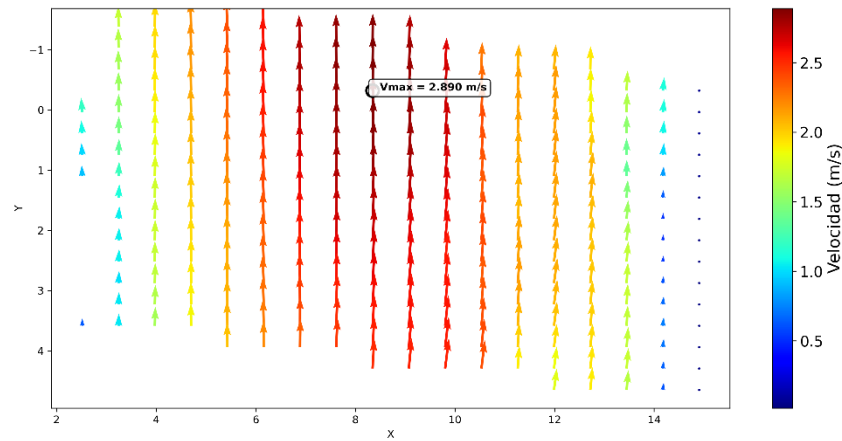


*Figura 69 Batimetría en la sección Tarqui DJ Yanuncay (Quinta Campaña) (Fuente; Propia)*

En la sección analizada del río Tarqui (Figura 70), se presentan el área de análisis y los campos de velocidad (Figura 71), observándose una distribución no homogénea del flujo, con una clara concentración de las mayores magnitudes en la zona central de la sección. Este comportamiento se relaciona con la mayor profundidad y continuidad del flujo en este sector, donde se registra una velocidad máxima de 2.890 m/s, confirmando la presencia del eje hidráulico principal.



*Figura 70 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s*



*Figura 71 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Quinta Campaña) (Fuente; Propia)*

El perfil de velocidades superficiales (Figura 72) presenta una distribución asimétrica, con un incremento progresivo desde el margen izquierdo hasta alcanzar una velocidad máxima de 2.862 m/s en la abscisa 6.966 m, coincidiendo con el sector donde el flujo presenta mayor continuidad. A partir de este punto, las velocidades disminuyen gradualmente hacia el margen derecho, comportamiento asociado a la reducción del tirante hidráulico y al incremento de la fricción lateral. Esta tendencia se refleja directamente en el caudal parcial, donde los mayores aportes se concentran en la zona central, con valores superiores a 2.700 m<sup>3</sup>/s, mientras que en los extremos la contribución es considerablemente menor. Para la estimación del caudal se aplicó un coeficiente de correlación de 0.85, con el fin de transformar las velocidades superficiales obtenidas mediante LSPIV en velocidades medias representativas de la sección. La integración de la distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal total de 34.406 m<sup>3</sup>/s, lo que evidencia una elevada capacidad de transporte del flujo durante esta campaña y confirma que la concentración de velocidades en el eje principal del cauce constituye el principal factor que controla la dinámica hidráulica del río Tarqui bajo estas condiciones (Tabla 25).

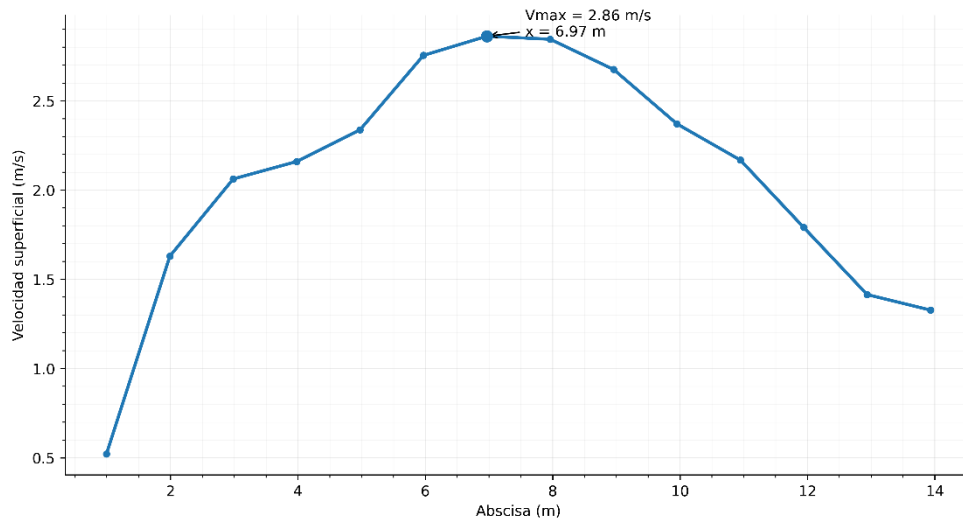


Figura 72 Perfil de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Quinta Campaña) (Fuente; Propia)

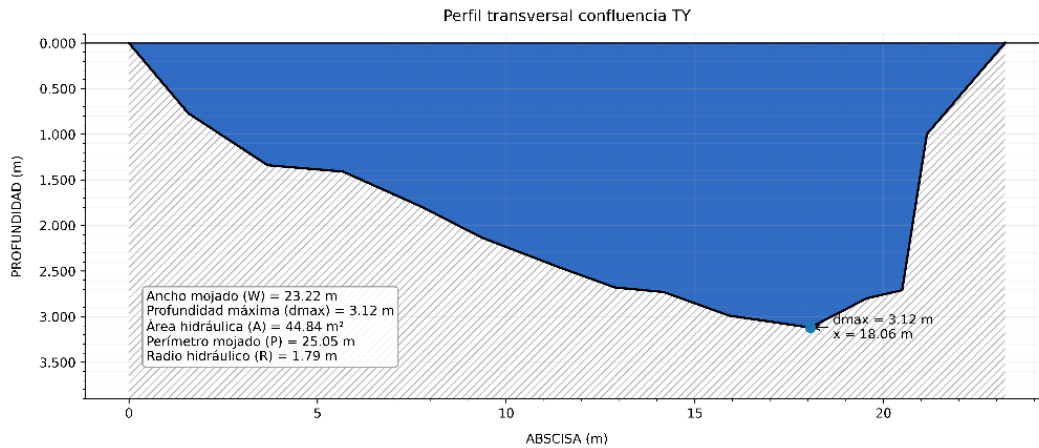
Tabla 25 Velocidades y Caudales con LSPIV Quinta Campaña Tarqui (Fuente; Propia)

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m <sup>3</sup> /s)
0,995	1,388	0,522	0,360
1,990	1,386	1,630	2,249
2,986	1,384	2,062	2,842
3,981	1,383	2,160	2,972
4,976	1,381	2,338	3,212
5,971	1,354	2,755	3,711
6,966	1,312	2,862	3,738
7,962	1,271	2,845	3,599
8,957	1,205	2,676	3,209
9,952	1,130	2,371	2,667
10,947	1,055	2,168	2,277
11,942	0,981	1,790	1,747
12,937	0,906	1,415	1,275
13,933	0,831	1,328	0,549
<b>TOTAL</b>			<b>34,406</b>

#### 4.5.3 Medición en la Rio Yanuncay DJ Rio Tarqui

La batimetría correspondiente a esta sección se presenta en la (Figura 73), donde se observa que la mayor profundidad se concentra hacia el margen derecho, alcanzando un valor máximo de 3.12 m, lo que evidencia el desplazamiento del eje principal del flujo hacia este sector. Además, la sección presenta un ancho mojado de 23.22 m, el mayor registrado

entre los puntos analizados, reflejando la influencia de la unión de los ríos Tarqui y Yanuncay. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo, observándose una pendiente más pronunciada hacia el margen izquierdo y una depresión progresiva hacia la zona derecha, lo que influye directamente en la distribución transversal del flujo y favorece una mayor concentración del caudal en esta sección.



*Figura 73 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente: Propia)*

El Campo de velocidades (Figura 75), presenta una distribución no homogénea, con una clara concentración de las mayores magnitudes en la zona central de la sección, donde se registra una velocidad máxima de 3.241 m/s, evidenciando una alta eficiencia hidráulica en este sector. Hacia ambos márgenes, las velocidades disminuyen progresivamente debido a la menor profundidad y al incremento de la fricción lateral, lo que reduce la capacidad de transporte en estas zonas. Esta variación transversal confirma la presencia de un eje principal del flujo bien definido y evidencia la influencia directa de la geometría de la sección en la distribución de las velocidades superficiales en la confluencia.



Figura 74 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s

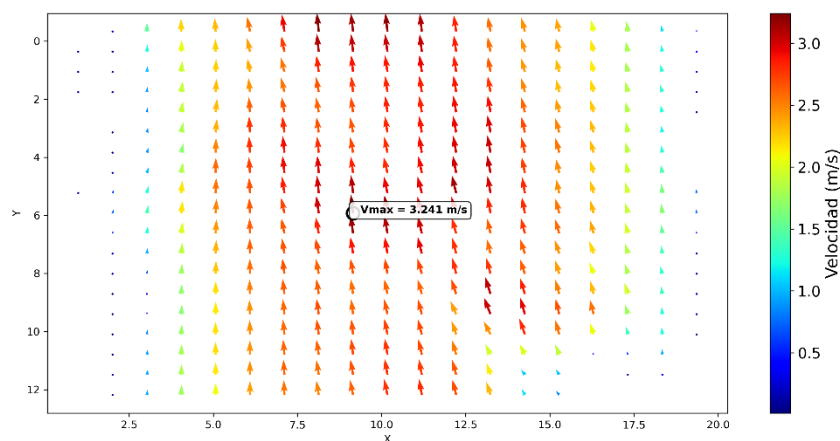


Figura 75 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia)

El perfil de velocidades superficiales en la confluencia de los ríos Yanuncay DJ rio Tarqui (Figura 76), presenta una distribución claramente definida, con una concentración de las mayores magnitudes en la zona central de la sección, donde se registra una velocidad máxima de 3.029 m/s, evidenciando una elevada eficiencia hidráulica y una marcada continuidad del flujo en este sector. Hacia ambos márgenes, las velocidades disminuyen progresivamente debido a la menor profundidad y al incremento de la fricción lateral, lo que reduce la contribución al caudal en estas zonas. La integración de esta distribución de velocidades con la geometría de la sección permitió estimar un caudal total de 70.116 m<sup>3</sup>/s, constituyéndose en el valor más alto registrado entre todas las campañas de medición. Este resultado refleja la influencia directa de la confluencia de ambos ríos, donde la combinación de sus aportes incrementa significativamente el volumen transportado y concentra la mayor

capacidad de flujo en el eje principal del cauce, confirmando el comportamiento hidráulico más representativo y de mayor magnitud observado durante el estudio (Tabla 26).

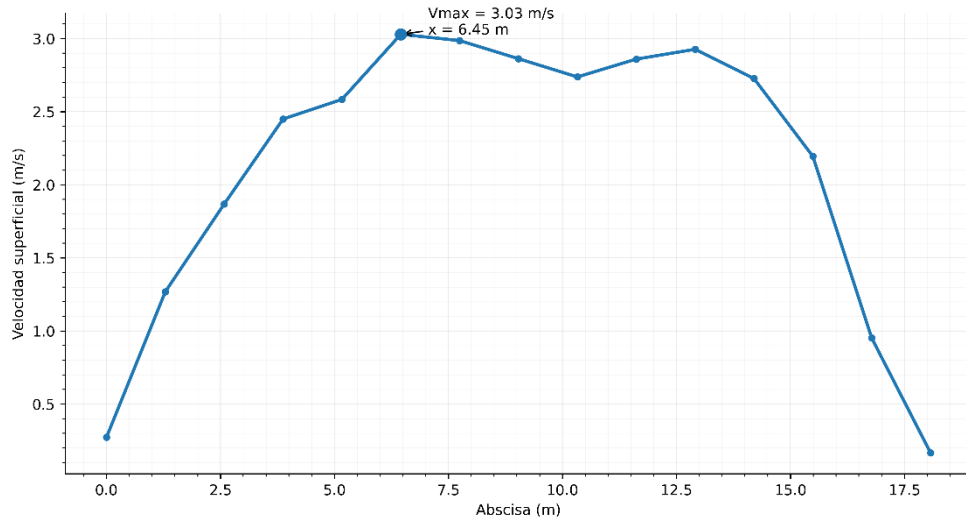


Figura 76 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Quinta Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 26 Velocidades y Caudales con LSPIV Quinta Campaña Confluencia (Fuente; Propia)

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m/s)
0,000	0,000	0,272	0,000
1,291	0,631	1,269	0,879
2,582	1,043	1,868	2,138
3,873	1,347	2,450	3,620
5,164	1,392	2,584	3,947
6,454	1,555	3,029	5,168
7,745	1,795	2,986	5,880
9,036	2,065	2,862	6,487
10,327	2,289	2,738	6,874
11,618	2,492	2,860	7,818
12,909	2,681	2,927	8,610
14,200	2,735	2,727	8,184
15,491	2,927	2,195	7,049
16,782	3,043	0,952	3,178
18,073	3,117	0,166	0,285
<b>TOTAL</b>			<b>70,116</b>

#### 4.5.4 . Validación de Resultados Quinta Campaña

De manera consistente con las campañas anteriores, el río Yanuncay, río Tarqui y la confluencia presentan una alta concordancia entre los caudales estimados mediante la metodología LSPIV y los datos reportados por ETAPA EP, registrándose variaciones de 4.43%, 2.18% y 0.09 %, respectivamente. Estas bajas discrepancias evidencian condiciones de flujo con una distribución de velocidades superficial relativamente uniforme y una adecuada representatividad de la sección transversal analizada, lo que favorece la precisión en la estimación del caudal (Tabla 27).

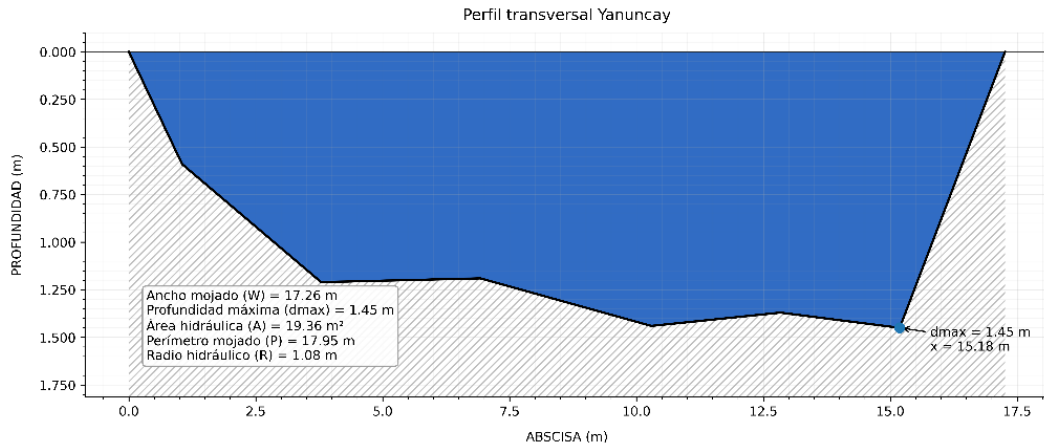
*Tabla 27 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Quinta Campaña*

<b>Quinta Campaña</b>			
<b>Rio</b>	<b>Etapa m3/s</b>	<b>LSPIV m3/s</b>	<b>Variación %</b>
<b>Yanuncay</b>	34,17	34,916	2,18
<b>Tarqui</b>	36	34,406	4,43
<b>Confluencia</b>	70,17	70,11	0,09

#### 4.6 Recolección de Datos de la Sexta Campaña

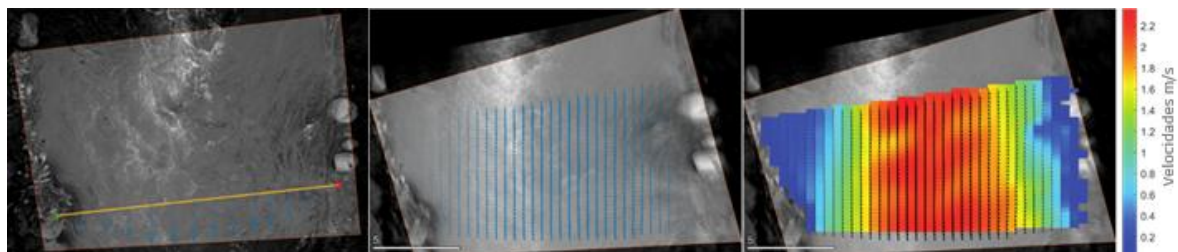
##### 4.6.1 Medición en el Río Yanuncay AJ Río Tarqui

La batimetría correspondiente a esta sección (Figura 77), presenta un ancho aproximado de 17.26 m y una profundidad máxima de 1.45 m, localizada hacia el margen derecho de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.

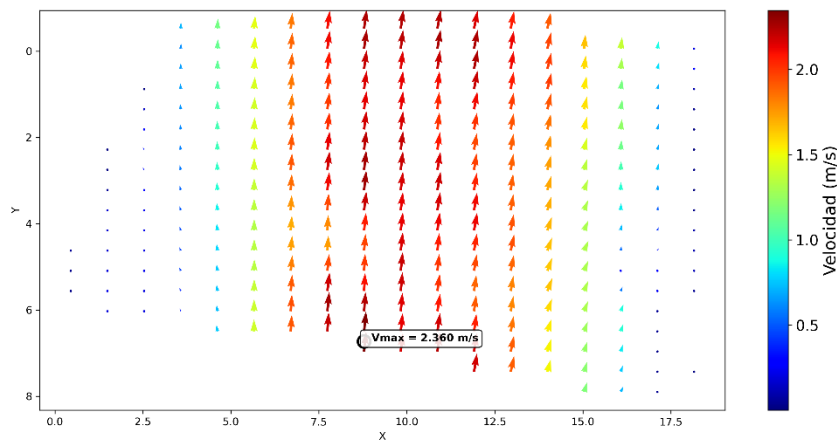


*Figura 77 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia)*

El campo de velocidades (Figura 79) en la sección del río Yanuncay Figura 78, presenta una distribución no homogénea, con una clara concentración de las mayores magnitudes en la zona central de la sección, donde se registra una velocidad máxima de 2.360 m/s, evidenciando una alta eficiencia hidráulica en este sector. Hacia ambos márgenes, las velocidades disminuyen progresivamente debido a la menor profundidad y al incremento de la fricción lateral, lo que reduce la capacidad de transporte en estas zonas. Esta variación transversal confirma la presencia de un eje principal del flujo bien definido y evidencia la influencia directa de la geometría de la sección en la distribución de las velocidades superficiales.



*Figura 78 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay AJ Tarqui en m/s*



*Figura 79 Campo de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia)*

El perfil transversal de velocidades superficiales (Figura 80), muestra un incremento progresivo desde los márgenes hacia la zona media del cauce, donde se alcanza una velocidad máxima de 2.251 m/s, y posteriormente se evidencia una disminución gradual hacia el margen opuesto. Como resultado de esta distribución transversal, el caudal total estimado fue de 27.544 m<sup>3</sup>/s, reflejando una condición hidráulica todavía elevada; sin embargo, inferior a la registrada en la campaña de mayor escorrentía. Esta reducción se asocia a la disminución de las precipitaciones previas, lo que provocó menores aportes de caudal y una disminución general de las velocidades, evidenciando la influencia directa de los factores climáticos en la dinámica del flujo durante la campaña final (Tabla 28).

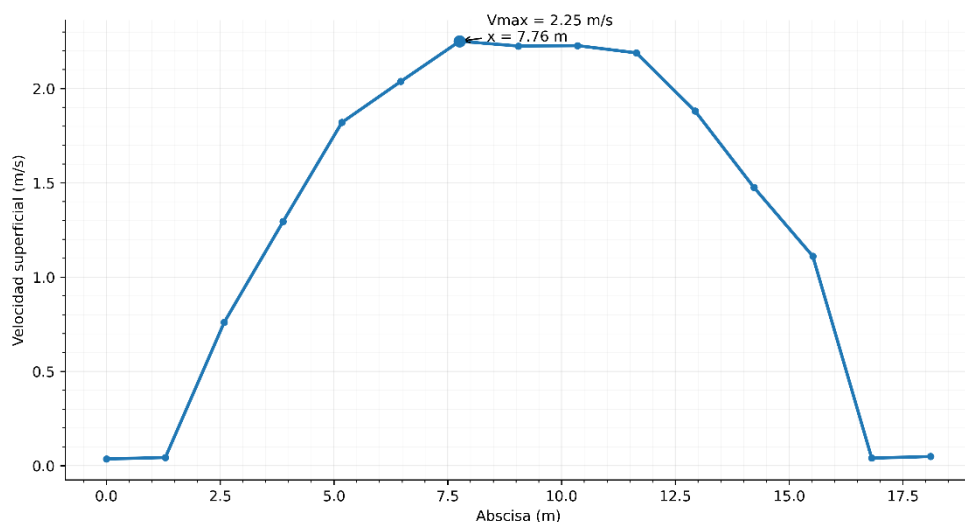


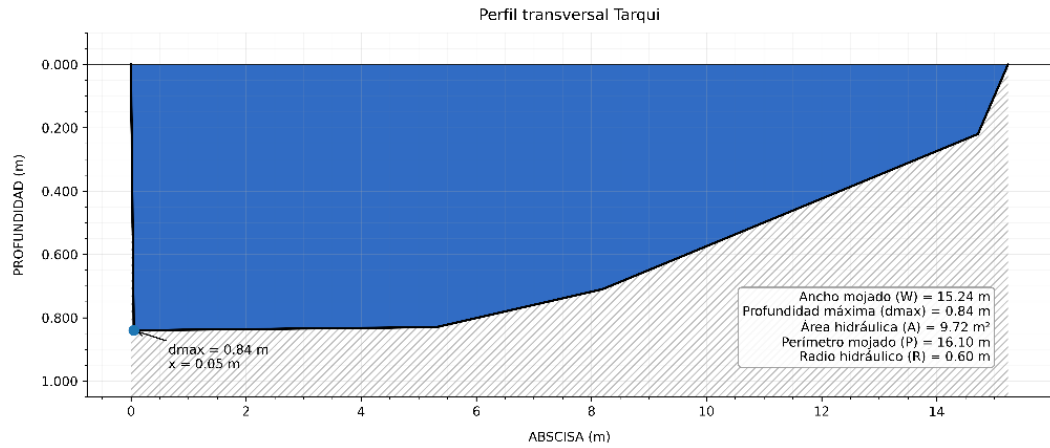
Figura 80 Perfil de velocidades Yanuncay AJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 28 Velocidades y Caudales con LSPIV Sexta Campaña Yanuncay (Fuente; Propia)

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m/s)
0,000	0,000	0,036	0,000
1,294	0,645	0,044	0,031
2,587	0,938	0,760	0,784
3,881	1,209	1,294	1,721
5,174	1,201	1,820	2,404
6,468	1,193	2,037	2,672
7,761	1,252	2,251	3,099
9,055	1,348	2,225	3,298
10,348	1,438	2,228	3,523
11,642	1,403	2,189	3,377
12,935	1,373	1,881	2,840
14,229	1,417	1,475	2,299
15,522	1,214	1,111	1,482
16,816	0,310	0,040	0,014
18,109	0,000	0,049	0,000
<b>TOTAL</b>			<b>27,544</b>

#### 4.6.2 Medición en el Río Tarqui AJ Río Yanuncay

La batimetría correspondiente a esta sección del río Tarqui (Figura 81), presenta un ancho aproximado de 15.24 m y una profundidad máxima de 0.84 m, localizada hacia el margen izquierdo de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.



*Figura 81 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Sexta Campaña) (Fuente; Propia)*

El campo de velocidades (Figura 83) en la sección del río Tarqui Figura 82 y 83, presenta una distribución no homogénea, con una marcada concentración de las mayores magnitudes en la zona central del cauce, donde se registra una velocidad máxima de 3.996 m/s, evidenciando una alta eficiencia hidráulica en este sector. Hacia los márgenes izquierdo y derecho, las velocidades disminuyen progresivamente hasta valores cercanos a 0 m/s, debido a la menor profundidad y al incremento de la fricción lateral, lo que reduce la capacidad de transporte en estos extremos. Esta variación transversal permite identificar claramente el eje principal del flujo, el cual se mantiene alineado con la dirección del cauce, confirmando que la geometría de la sección controla directamente la distribución de las velocidades superficiales y el comportamiento hidráulico del río Tarqui durante esta campaña.

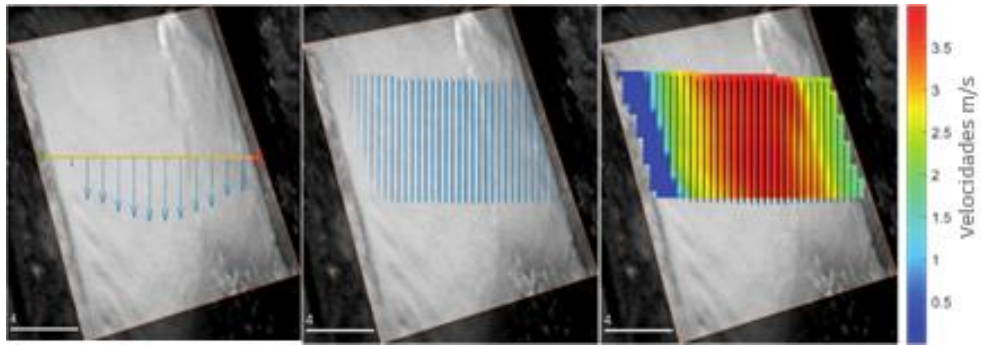


Figura 82 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Tarqui AJ Yanuncay en m/s

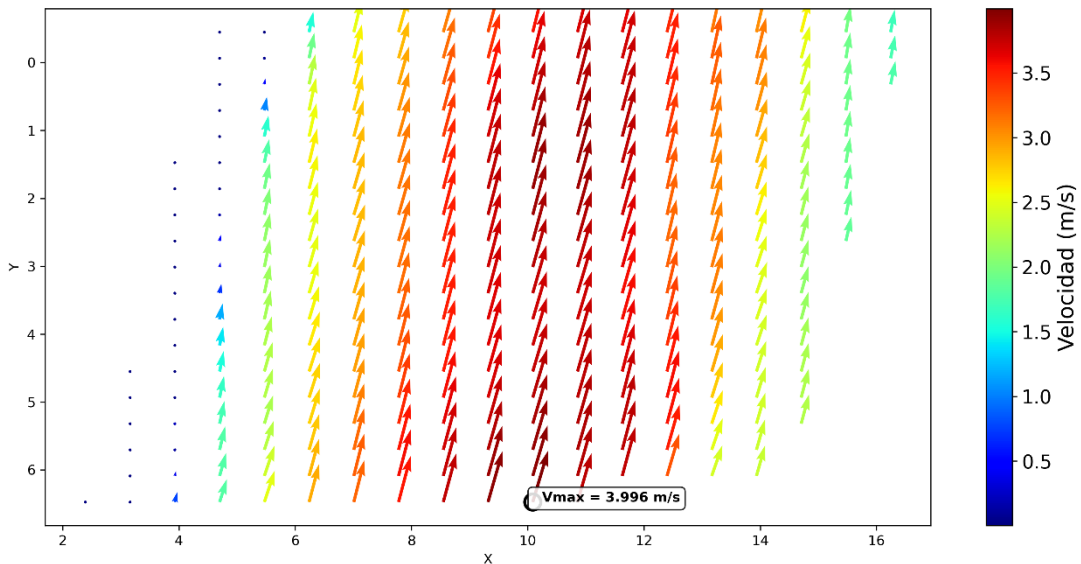


Figura 83 Campo de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Sexta Campaña) (Fuente; Propia)

El perfil transversal de velocidades superficiales (Figura 84) en el río Tarqui durante la primera campaña muestra un incremento progresivo desde el margen izquierdo hacia la zona central del cauce, donde se alcanza una velocidad máxima de 3.884 m/s, y posteriormente se evidencia una disminución gradual hacia el margen derecho hasta valores cercanos a 0 m/s. Como resultado de esta distribución transversal, el caudal total estimado fue de 23.612 m<sup>3</sup>/s, reflejando una importante capacidad de transporte del flujo en esta sección. La concentración de las mayores velocidades en la zona media confirma la presencia del eje principal del flujo, mientras que la reducción hacia los extremos se asocia

a la menor profundidad y al incremento de la fricción lateral, condiciones que controlan la dinámica hidráulica del río Tarqui durante esta campaña (Tabla 29).

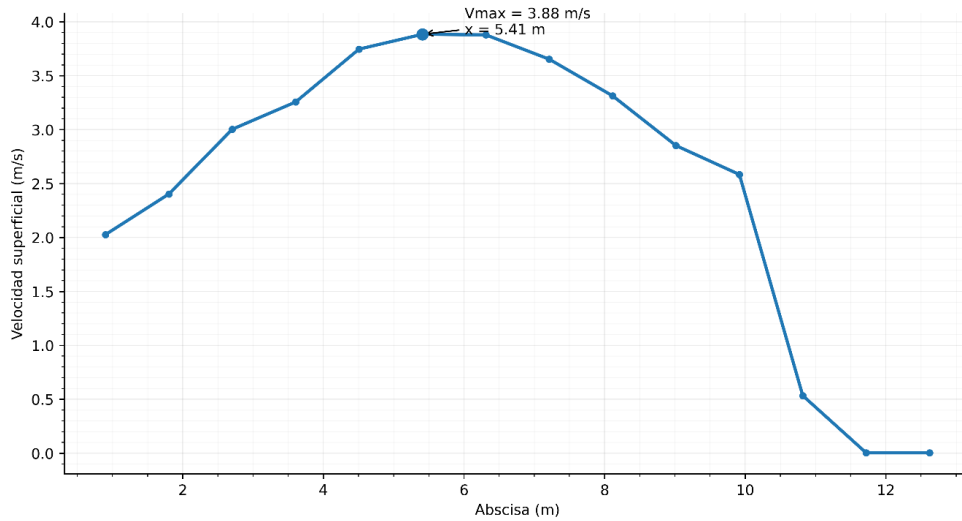


Figura 84 Perfil de velocidades Tarqui AJ Yanuncay (Sexta Campaña) (Fuente; Propia)

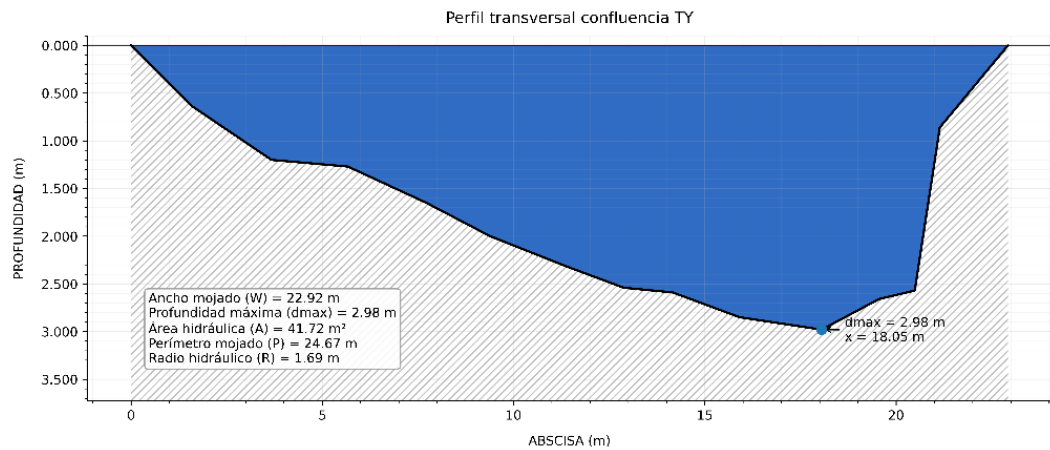
Tabla 29 Velocidades y Caudales con LSPIV Sexta Campaña Tarqui (Fuente; Propia)

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m3/s)
0,902	0,838	2,027	0,651
1,803	0,837	2,403	1,541
2,705	0,835	3,004	1,922
3,606	0,833	3,256	2,079
4,508	0,832	3,747	2,387
5,409	0,826	3,884	2,457
6,311	0,788	3,879	2,343
7,213	0,751	3,653	2,102
8,114	0,713	3,313	1,811
9,016	0,648	2,852	1,417
9,917	0,580	2,584	1,149
10,819	0,513	0,533	0,210
11,721	0,445	0,003	0,001
12,622	0,377	0,003	0,000
<b>TOTAL</b>			<b>20,070</b>

#### 4.6.1 Medición en la Rio Yanuncay DJ Rio Tarqui

La batimetría correspondiente a la confluencia (Figura 85), presenta un ancho aproximado de 22.92 m y una profundidad máxima de 2.98 m, localizada hacia el margen

derecho de la sección. La vista del perfil está representada desde aguas arriba hacia aguas abajo.



*Figura 85 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia)*

El campo de velocidades (Figura 87) en la confluencia, presenta una distribución no homogénea, con una marcada concentración de las mayores magnitudes en la zona central de la sección, donde se registra una velocidad máxima de 3.222 m/s, evidenciando una elevada eficiencia hidráulica en este sector producto de la interacción de ambos cauces. Hacia los márgenes izquierdo y derecho, las velocidades disminuyen progresivamente hasta valores cercanos a 0 m/s, debido a la menor profundidad relativa y al incremento de la fricción lateral, lo que reduce la capacidad de transporte en estas zonas. Esta variación transversal permite identificar claramente el eje principal del flujo, el cual se mantiene alineado con la dirección del cauce, confirmando que la geometría de la sección y la confluencia de los ríos controlan directamente la distribución de las velocidades superficiales y el comportamiento hidráulico del flujo en esta campaña.

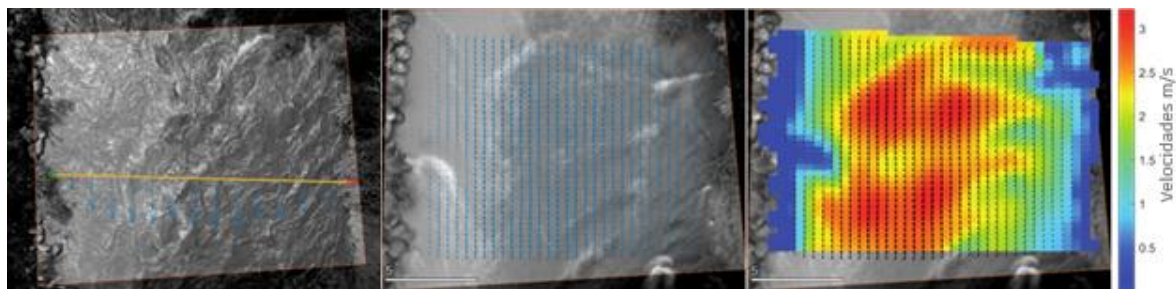


Figura 86 Sección de control (Lado Izquierdo), Campo de velocidad vectorial (Centro), y Campo de velocidad promedio (Lado Derecho) Yanuncay DJ Tarqui en m/s

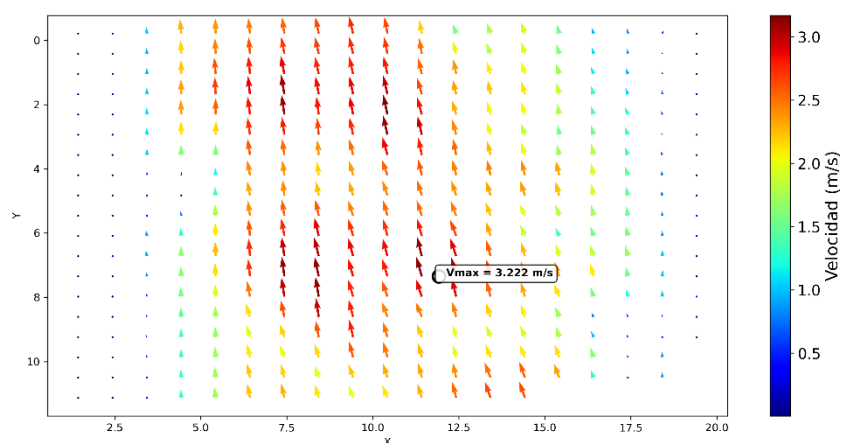


Figura 87 Campo de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia)

El perfil transversal de velocidades superficiales en la confluencia (Figura 88), presenta un incremento progresivo desde los márgenes hacia la zona central del cauce, donde se alcanza una velocidad máxima de 2.784 m/s, y posteriormente se observa una disminución gradual hacia el margen derecho hasta valores cercanos a 0 m/s. Como resultado de esta distribución transversal, el caudal total estimado fue de 47.148 m<sup>3</sup>/s, reflejando una condición hidráulica representativa de la interacción de ambos cauces. La concentración de las mayores velocidades en la zona media confirma la presencia del eje principal del flujo, mientras que la reducción hacia los extremos se asocia a la menor profundidad relativa y al incremento de la fricción lateral, factores que controlan la distribución de velocidades y el comportamiento hidráulico en esta sección durante la última campaña (Tabla 30).

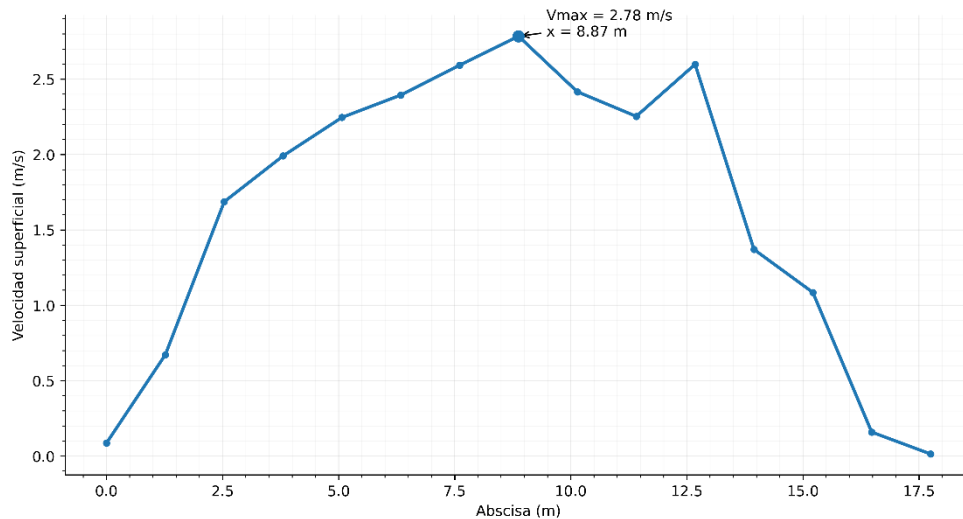


Figura 88 Perfil de velocidades Yanuncay DJ Tarqui (Sexta Campaña) (Fuente; Propia)

Tabla 30 Velocidades y Caudales con LSPIV Sexta Campaña Confluencia (Fuente; Propia)

<b>Abscisa (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Velocidad con LSPIV (m/s)</b>	<b>Caudal con LSPIV (m/s)</b>
0,0000	0,0000	0,0864	0,0000
1,2678	0,5083	0,6723	0,3682
2,5355	0,8915	1,6868	1,6205
3,8033	1,2046	1,9911	2,5845
5,0711	1,2490	2,2459	3,0229
6,3388	1,3940	2,3945	3,5969
7,6066	1,6289	2,5925	4,5506
8,8743	1,8921	2,7848	5,6780
10,1421	2,1197	2,4162	5,5191
11,4099	2,3210	2,2534	5,6358
12,6776	2,5102	2,5984	7,0287
13,9454	2,5816	1,3706	3,8130
15,2132	2,7463	1,0857	3,2129
16,4809	2,8845	0,1591	0,4945
17,7487	2,9614	0,0141	0,0225
<b>TOTAL</b>			<b>47,1481</b>

#### 4.6.2 Validación de resultados Sexta Campaña

Los resultados obtenidos en la sexta campaña muestran un comportamiento consistente con lo observado en las campañas anteriores, evidenciando una buena concordancia entre los caudales estimados mediante la metodología LSPIV y los datos reportados por ETAPA EP en el río Yanuncay, río Tarqui y en la confluencia. En estas

secciones se registraron variaciones de 3.05 %, 8.55% y 0.53 %, respectivamente, lo que confirma la confiabilidad del método bajo condiciones de flujo con una distribución de velocidades superficial relativamente uniforme y una adecuada representatividad de la sección transversal analizada (Tabla 31).

*Tabla 31 Comparativa de los datos de ETAPA EP y Método LSPIV Sexta Campaña*

<b>Sexta Campaña</b>			
<b>Rio</b>	<b>Etapa m3/s</b>	<b>LSPIV m3/s</b>	<b>Variación %</b>
<b>Yanuncay</b>	28,41	27,543	3,05
<b>Tarqui</b>	18,49	20,070	8,55
<b>Confluencia</b>	46,9	47,148	0,53

#### **4.7 Discusión**

Los resultados obtenidos en las seis campañas de medición permitieron validar la aplicabilidad de la metodología LSPIV para la estimación de velocidades superficiales y caudales en los ríos Yanuncay, Tarqui y en su confluencia. Para todos los casos analizados se empleó un factor de corrección de 0.85, con el fin de convertir la velocidad superficial en velocidad media, considerando la distribución vertical típica del flujo en cauces naturales. Bajo esta condición, los resultados mostraron una alta concordancia con los datos reportados por ETAPA EP, especialmente en el río Yanuncay y en la confluencia, donde se registraron variaciones promedio de 4.02 % y 1.29 %, respectivamente, lo que confirma la confiabilidad del método en secciones con flujo relativamente uniforme y adecuada profundidad hidráulica

*Tabla 32 Resultados en base a las variaciones con respecto a ETAPA EP (Fuente; Propia)*

<b>Rio</b>	<b>Primera Campaña</b>	<b>Segunda Campaña</b>	<b>Tercera Campaña</b>	<b>Cuarta Campaña</b>	<b>Quinta Campaña</b>	<b>Sexta Campaña</b>	<b>Pro medio</b>
<b>Yanuncay</b>	5,15	3,45	5,57	4,70	2,18	3,05	4,02
<b>Tarqui</b>	1,21	9,53	4,78	51,47	4,43	8,55	13,33

<b>Confluencia</b>	0,06	1,27	4,55	1,26	0,09	0,53	1,29
--------------------	------	------	------	------	------	------	------

Por otro lado, el río Tarqui presentó una variación promedio de 13.33% al considerar el valor máximo registrado de 51.47 %, el cual se identifica como un valor atípico, ya que se aleja significativamente del comportamiento observado en el resto de las mediciones. Al excluir este valor, se obtiene un promedio de 5.70%, reflejando de manera más representativa el desempeño del método. Esta discrepancia se atribuye principalmente a las condiciones hidráulicas particulares de la sección, caracterizadas por menor profundidad, mayor rugosidad e irregularidad del lecho, y una distribución transversal heterogénea del campo de velocidades.

El mayor caudal se registró durante la quinta campaña (70.11 m<sup>3</sup>/s), realizada a mediados de febrero, coincidiendo con el inicio del periodo lluvioso en el sur del Ecuador. En contraste, los valores más bajos se observaron en la primera y segunda campaña (12.51 m<sup>3</sup>/s y 12.77 m<sup>3</sup>/s), correspondientes a finales de enero y comienzos de febrero, periodo que marca la transición entre el estiaje y el inicio de la temporada de lluvias. Estos últimos se clasifican como caudales normales, mientras que el primero corresponde a un nivel de prealerta.

En términos generales, los resultados confirman que el uso de un factor de corrección de 0.85 permitió obtener estimaciones de caudal confiables y coherentes con los datos de referencia, evidenciando que la metodología LSPIV constituye una herramienta válida para el análisis hidrodinámico superficial y la estimación de caudales en ríos naturales, especialmente en secciones con condiciones de flujo uniforme, e identificando sus limitaciones en cauces con alta heterogeneidad hidráulica.

## **5. CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 CONCLUSIONES**

La aplicación de la técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) permitió estimar la velocidad superficial y el caudal en los ríos Yanuncay, Tarqui y en su confluencia, evidenciando una adecuada concordancia con los datos de referencia proporcionados por ETAPA EP. Los resultados obtenidos durante las diferentes campañas mostraron variaciones promedio de 4.02% en el río Yanuncay, 5.70% en el río Tarqui y 1.29% en la confluencia, confirmando la confiabilidad del método en secciones con flujo relativamente uniforme, geometría definida y suficiente profundidad hidráulica.

La técnica LSPIV, aplicada mediante el software RIVeR, demostró ser una herramienta eficaz para la estimación de velocidades superficiales y caudales durante eventos de crecida moderada, permitiendo registrar en la confluencia valores superiores a 70 m<sup>3</sup>/s, lo que respalda la confiabilidad del método para la obtención de información hidráulica en condiciones de alto caudal sin necesidad de instrumentación intrusiva en el cauce.

El uso de imágenes de alta resolución permitió caracterizar la estructura del flujo superficial y generar campos de velocidad espacialmente distribuidos, facilitando la identificación del comportamiento hidrodinámico en cada sección. La aplicación de un factor de corrección de 0.85 permitió obtener estimaciones consistentes de la velocidad media y del caudal, confirmando la validez de este coeficiente bajo las condiciones evaluadas. En conjunto, los resultados demuestran que la precisión del método está directamente condicionada por las características hidráulicas del cauce, presentando mayor confiabilidad en condiciones de flujo uniforme y mayores incertidumbres en secciones con alta heterogeneidad hidráulica.

Finalmente, la integración de la técnica LSPIV con el software RIVeR demostró ser una alternativa eficiente y no intrusiva para el monitoreo hidrológico en ríos naturales, permitiendo la obtención de información hidrodinámica precisa con una reducción significativa en los tiempos de procesamiento y análisis de datos. Estas ventajas, junto con su capacidad de aplicación durante condiciones analizadas en el presente, posicionan esta metodología como una herramienta técnicamente viable para el monitoreo, evaluación y gestión de los recursos hídricos en sistemas fluviales.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Con base en los resultados obtenidos y en el análisis comparativo desarrollado durante las campañas de medición, se plantean las siguientes recomendaciones orientadas a optimizar la precisión y aplicabilidad de la técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) en la estimación de velocidades superficiales y caudales en cauces naturales:

Se recomienda seleccionar cuidadosamente el área de análisis, priorizando secciones con flujo uniforme, suficiente profundidad y ausencia de obstáculos emergentes, como material rocoso expuesto, irregularidades del lecho o zonas de recirculación. Estas condiciones influyen directamente en la distribución transversal del campo de velocidades y en la representatividad de la velocidad superficial, tal como se evidenció en el río Tarqui, donde la presencia de estas características generó las mayores discrepancias en la estimación del caudal.

El levantamiento batimétrico de la sección transversal debe realizarse preferentemente durante periodos de estiaje, considerando que la geometría del cauce presenta variaciones mínimas y que estas condiciones permiten ejecutar las mediciones con mayor seguridad y precisión, reduciendo el riesgo operativo para el personal y los equipos.

Esta información constituye un insumo fundamental para el cálculo hidráulico y la correcta interpretación de los resultados obtenidos mediante LSPIV.

Durante la adquisición de imágenes, es fundamental evitar condiciones ambientales adversas, como vientos intensos o vibraciones de la plataforma de grabación, ya que estos factores afectan la estabilidad de las imágenes y reducen la calidad del procesamiento. Asimismo, se recomienda utilizar equipos con adecuada resolución espacial y temporal, que permitan un seguimiento preciso de los trazadores superficiales y la correcta generación de los campos de velocidad.

En el procesamiento mediante el software RIVeR, se recomienda que los puntos de control (CPs) sean claramente visibles, estén distribuidos homogéneamente y delimiten adecuadamente el área de estudio, preferentemente ubicados en los extremos de la sección transversal. Una correcta distribución de estos puntos permite mejorar la orto-rectificación de las imágenes y reducir errores geométricos que afectan la precisión de los resultados.

Finalmente, se recomienda la implementación de sistemas de monitoreo basados en cámaras fijas instaladas en puntos estratégicos, lo que permitiría mejorar la estabilidad en la adquisición de imágenes, optimizar el procesamiento mediante el software RIVeR y facilitar la obtención continua de información hidrodinámica. Esta estrategia resulta especialmente relevante durante eventos de crecida, donde los métodos tradicionales presentan limitaciones operativas, mayores riesgos y dificultades logísticas, posicionando al LSPIV como una alternativa eficiente y segura para el monitoreo hidrológico.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Adrian, R. (1991). Particle-Imaging Techniques For Experimental Fluid-Mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 261–304. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.23.1.261>
- Aldana Quizhpi, B. S., & Tsenkush Shakai, T. S. (2024). *Caracterización experimental y numérica de velocidad superficial de la confluencia del Río Tarqui y Yanuncay aplicando la técnica LSPIV* [Universidad Católica de Cuenca.]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/18390>
- Andrade, L. (2015). *Medición del flujo superficial en canales a través de medios visuales* [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Botelli, C., Guillen, N., García, C., Patalano, A., & Chalabe, M. (2020). Aplicación de la técnica LSPIV en el diseño hidrológico de infraestructura hídrica. *Cuadernos de Ingeniería*, 12, 21–38. <https://doi.org/10.53794/ci.v12iXII.327>
- Cabezudo Tejeda, R. (2017). *Análisis comparativo hidrotopográfico en ríos mediante técnica manual y telemétricas* [Universidad de Valladolid]. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/28368>
- Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., & Hauet, A. (2011). Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage–discharge curves. *Journal of Hydro-Environment Research*, 5(4), 301–312. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.12.005>
- Fernandez de Cordova, J. (2021a). *Propuesta de un Sistema de Alerta Temprana ante Inundaciones por lluvias intensas. Caso de estudio: río Yanuncay en Cuenca - Ecuador.*
- Fernandez de Cordova, J. (2021b). *Propuesta de un Sistema de Alerta Temprana ante Inundaciones por lluvias intensas. Caso de estudio: río Yanuncay en Cuenca - Ecuador.*
- Fleit, G., & Baranya, S. (2022). LSPIV analysis of ship-induced wave wash. *Experiments in Fluids*, 63(10), 160. <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03508-4>
- Flora, K. (2017). *Flood Flow Estimation using Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV).*
- Guillén, N. F., Patalano, A., García, C. M., & Bertoni, J. C. (2017). Use of LSPIV in assessing urban flash flood vulnerability. *Natural Hazards*, 87(1), 383–394. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2768-8>
- Huang, W.-C., Young, C.-C., & Liu, W.-C. (2018). Application of an Automated Discharge Imaging System and LSPIV during Typhoon Events in Taiwan. *Water*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/w10030280>

- Lewis, Q. W., & Rhoads, B. L. (2018). LSPIV Measurements of Two-Dimensional Flow Structure in Streams Using Small Unmanned Aerial Systems: 1. Accuracy Assessment Based on Comparison With Stationary Camera Platforms and In-Stream Velocity Measurements. *Water Resources Research*, *54*(10), 8000–8018. <https://doi.org/10.1029/2018WR022550>
- Massó, L. (2018). *Caracterización de flujos en modelos físicos y prototipos utilizando técnicas de velocimetría por imágenes (LSPIV, LSPTV y STIV)*.
- Massó, L., Patalano, A., García, C. M., Ochoa García, S. A., & Rodríguez, A. (2024). Enhancing LSPIV accuracy in low-speed flows and heterogeneous seeding conditions using image gradient. *Flow Measurement and Instrumentation*, *100*, 102706. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102706>
- Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research - WATER RESOUR RES*, *44*. <https://doi.org/10.1029/2008WR006950>
- Naranjo, D. (2018). *Elaboración de hidrogramas de crecidas de las cuencas de los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay desde el año 1997-2017*. Universidad del Azuay.
- Ochoa-García, S. A., Massó, L., Patalano, A., Matovelle-Bustos, C. M., & Delgado-Garzón, P. V. (2025). Baseflow measurement in mountain rivers using LSPIV: A case study of the Tarqui and Yanuncay rivers in the Ecuadorian Andes. *Revista de Teledetección*, (66). <https://doi.org/10.4995/raet.2025.22733>
- Patalano, A. (2017). *Desarrollo e implementación en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre* [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional de Córdoba .
- Patalano, A., García, C. M., & Rodríguez, A. (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*, *109*, 323–330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>
- Rosas Flores, F. S., & Tejada Flores, S. P. (2020). *Método LSPIV para el cálculo de la velocidad superficial en escurrimientos fluviales*. Universidad Peruana Union.
- Tauro, F., Piscopia, R., & Grimaldi, S. (2017a). Streamflow Observations From Cameras: Large Scale Particle Image Velocimetry or Particle Tracking Velocimetry? *Water Resources Research*, *53*. <https://doi.org/10.1002/2017WR020848>
- Tauro, F., Piscopia, R., & Grimaldi, S. (2017b). Streamflow Observations From Cameras: Large-Scale Particle Image Velocimetry or Particle Tracking Velocimetry? *Water Resources Research*, *53*(12), 10374–10394. <https://doi.org/10.1002/2017WR020848>

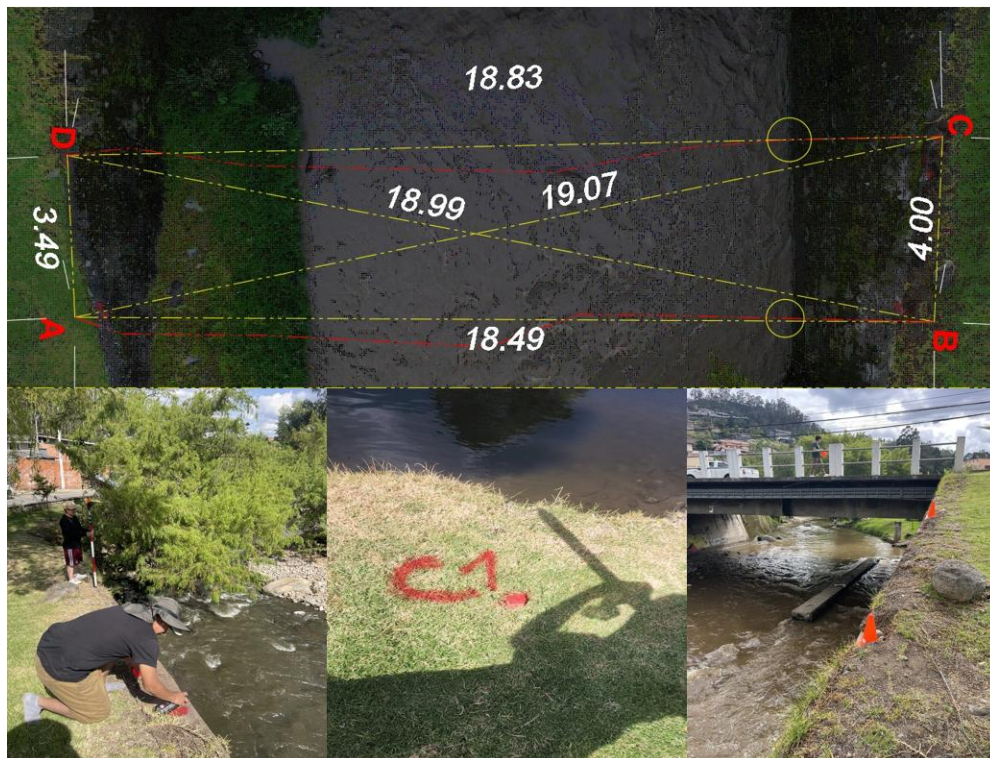
Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2. <https://doi.org/10.5334/jors.bl>

Vallejo, E. (2014). *Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5494>

## ANEXOS



*Anexo 1: Levantamiento topográfico de los Puntos de control CPs y perfiles de los cauces (Fuente; Propia).*



*Anexo 2: Punto de control CPs y distancias de rectificación (Fuente; Propia)*



*Anexo 3: Vuelos de dron y recolección de datos (Fuente; Propia)*




*Anexo 4: Registro de las mayores crecidas observadas (Fuente; Propia)*

## 7. AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros, David Samuel Cambisaca Guayacondo y Víctor Marcelo León Pauta portadores de las cédulas de ciudadanía N.º 0106323009 y N.º0107191611. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “CARACTERIZACIÓN DE LAS VELOCIDADES SUPERFICIALES EN EVENTOS EXTREMOS EN LA CONFLUENCIA DE LOS RÍOS TARQUI Y YANUNCAY MEDIANTE LA TÉCNICA LSPIV” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 27 de marzo de 2026



David Samuel Cambisaca Guayacondo

010632300-9



Víctor Marcelo León Pauta

010719161-1