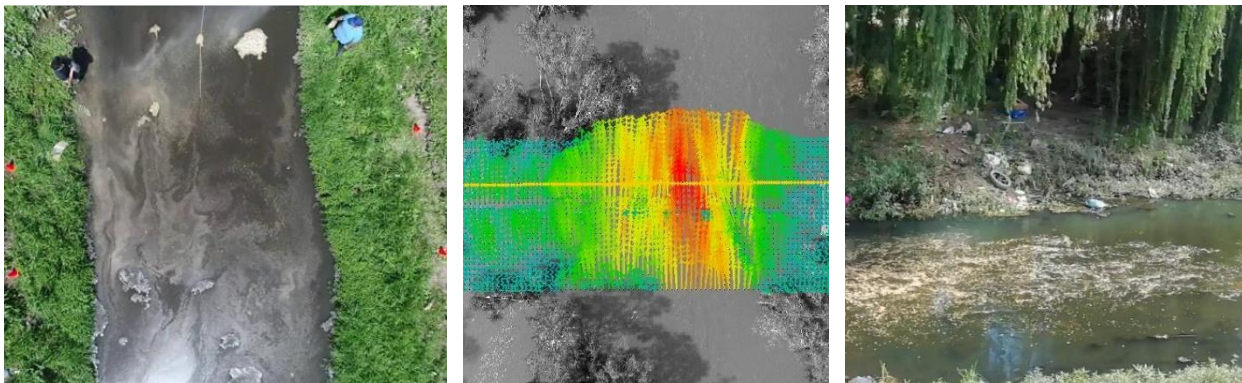




Aforos de ríos y arroyos en la Cuenca Matanza-Riachuelo

Informe 01

Estado del arte de la medición de caudales utilizando la técnica de velocimetría por imágenes



Programa Hidráulica Computacional

Subgerencia Laboratorio de Hidráulica Instituto Nacional del Agua

Proyecto INA 397
Informe LHA 01-397-21
Ezeiza, enero de 2021

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Ing. Juan Carlos BERTONI

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Lic. Máximo LANZETTA

DIRECTOR DE LA SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Pablo D. SPALLETTI

Equipo de trabajo (por orden alfabético)

Programa Hidráulica Computacional – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua

Dr. Ing. Pablo E. García | Santiago Guizzardi | Ing. Leandro Kazimierski | Ing. Marina Lagos
| Mayra Morale | Lic. Nicolás Ortiz | Msc. Ing. Mariano Re | Ing. Martín Sabarots Gerbec

Subgerencia Centro de la Región Semiárida – Instituto Nacional del Agua

Dr. Ing. Carlos G. Catalini | Ing. Ing. Giuliana Elcano | Msc. Ing. Ana I. Heredia Ligorria |
Geol. Nadia Mortarino

Informe realizado por:

Nicolás E. Ortiz

Marina Lagos

Mayra Morale

Mariano Re

Pablo E. García

Tabla de contenido

1	Introducción.....	5
1.1	Técnicas de aforos líquidos.....	5
1.2	Velocimetría por imágenes en la Argentina.....	6
2	Estado del arte.....	7
2.1	Antecedentes.....	7
2.2	Revisiones actuales.....	9
2.3	Software	10
3	Características de la técnica LSPIV	12
3.1	Metodología general	12
3.2	Adquisición de imágenes	12
3.3	Trazadores	14
3.4	Preprocesamiento	15
3.4.1	Estabilización de videos	15
3.4.2	Extracción de imágenes	17
3.4.3	Orto-rectificación de imágenes	17
3.4.4	Edición de imágenes	18
3.5	Procesamiento.....	19
3.5.1	Algoritmos de procesamiento	19
3.5.1.1	Algoritmo DCC	19
3.5.1.2	Algoritmo DFT.....	21
3.5.1.3	Algoritmo EC.....	21
3.5.2	Rectificación de resultados.....	22
3.5.3	Relación velocidad superficial - velocidad media.....	23
3.6	Postprocesamiento.....	24
3.6.1	Filtros.....	24
4	Aplicación de la técnica LSPIV	26
4.1	Características de procesamiento	26
4.2	Ejercicios de aplicación	26

4.2.1	Video tutorial Fudaa-LSPIV	27
4.2.2	Video tutorial RIVeR.....	28
4.2.3	Video 1 del Challenge FUDAA	29
4.2.4	Video 2 del Challenge FUDAA	30
4.2.5	Video 3 del Challenge FUDAA	32
4.2.6	Video 4 del Challenge FUDAA	33
4.2.7	Video 5 del Challenge FUDAA	34
4.2.8	Video 6 del Challenge FUDAA	35
4.2.9	Video 7 del Challenge FUDAA	36
4.2.10	Video 8 del Challenge FUDAA	38
4.2.11	Video Canal Villa Dolores	39
4.2.12	Video Castor River	40
4.2.13	Video La Morge River	41
4.2.14	Video Murg River	42
4.2.15	Video La Vence River	43
4.2.16	Video Salmon River	44
4.3	Sensibilidad de parámetros	45
4.3.1	Software Fudaa-LSPIV	45
4.3.1.1	Parámetros de búsqueda.....	45
4.3.1.2	Filtros de postprocesamiento	46
4.3.1.3	Tasa de extracción de imágenes (FPS)	46
4.3.2	Software RIVeR	47
4.3.2.1	Parámetros de búsqueda.....	47
4.3.2.2	Filtros de postprocesamiento	47
4.3.2.3	Tasa de extracción de imágenes (FPS)	47
5	Conclusiones	49
	Referencias	51

1 Introducción

El Convenio Específico Complementario 9, acordado entre la Autoridad de Cuenca Matanza-Riachuelo (ACUMAR) y el Instituto Nacional del Agua (INA), Aforos de ríos y arroyos en la cuenca Matanza-Riachuelo, plantea como objetivo general dar continuidad al monitoreo integrado y simultáneo de calidad y cantidad de agua superficial en el ámbito de esta cuenca. Entre los objetivos específicos de este convenio se destacan los siguientes: i) la realización de tres campañas de aforos en distintos puntos de la red de estaciones fijas manuales de calidad de agua superficial de la ACUMAR, ii) la colaboración con la operación de toda la red de estaciones hidrométricas donde se realicen mediciones comparando series históricas respecto a los nuevos datos que se obtengan, iii) el análisis de datos y la revisión de curvas H-Q, y iv) la implementación y evaluación de la performance de la técnica de velocimetría por imágenes para la medición de caudales. En este primer informe se detalla el estado del arte de las técnicas de medición de caudales en ríos y arroyos utilizando velocimetría por imágenes, describiendo las distintas alternativas existentes para su implementación (analizando antecedentes y algoritmos) y casos de estudio validados.

1.1 Técnicas de aforos líquidos

Las técnicas de aforos líquidos en ríos y arroyos históricamente se han basado en métodos mecánicos, electromagnéticos o acústicos que requieren contacto con el flujo para la medición. Diversos problemas (seguridad, logística, interferencias en la medición, etc.) limitan la aplicabilidad de estos métodos convencionales, por lo que en las últimas décadas se han desarrollado métodos no intrusivos basados en la detección remota de la velocidad de la superficie del agua utilizando análisis de secuencias de imágenes y radares Doppler, entre otros (Tauro, 2016). En el marco de las actividades de aforos líquidos realizadas en el ámbito de la cuenca Matanza-Riachuelo las metodologías utilizadas principalmente han sido las hidroacústicas. Específicamente, según el requerimiento de las secciones relevadas en la cuenca, como instrumentos de medición han sido utilizadas técnicas de medición con ADV (velocímetro acústico Doppler; *Acoustic Doppler Velocity*) y ADCP (perfilador de corriente acústico Doppler; *Acoustic Doppler Current Profiler*). La implementación de estas tecnologías basadas en el efecto Doppler (respecto de otras tradicionales como el uso de molinetes) permite obtener velocidades del flujo con mayor precisión, y ha significado una mejora sustantiva en las observaciones a partir de una mejor caracterización del flujo, disminuyendo los tiempos operativos y favoreciendo las mediciones en cursos particulares. El ADV registra puntualmente series temporales de las tres componentes del vector velocidad del flujo y generalmente se aplica en cauces pequeños

(estimación de caudal, caracterización de turbulencia, estudios en capa límite; entre otros usos). El ADCP también permite medir las tres componentes de la velocidad del flujo a través de un perfil, pero se lo utiliza en cauces naturales o artificiales con valores de profundidad mayores. Las principales técnicas de velocimetría por imágenes, los métodos no intrusivos más desarrollados, son las denominadas velocimetría por imágenes de partículas (PIV, *Particle Image Velocimetry*), velocimetría por seguimiento de partículas (PTV, *Particle Tracking Velocimetry*), y su implementación a gran escala (LSPTV y LSPIV, siendo LS en el acrónimo *Large Scale*). Estas técnicas de medición permiten caracterizar el campo de velocidades de flujos con alta resolución temporal y espacial mediante un análisis en el que se cuantifica el desplazamiento en el flujo de partículas sembradas (trazadores) o de patrones superficiales (Patalano et al., 2017). El abordaje que realiza PIV es de tipo euleriano (comparando desplazamientos de patrones superficiales o grupos de partículas) y el de PTV es de tipo lagrangiano (donde se sigue a cada partícula/trazador individualmente). A pesar de que las técnicas de velocimetría por imágenes resultan adecuadas para gran variedad de condiciones de flujo, presentan algunas limitaciones que tienen que ver con las condiciones de luminosidad sobre el curso de agua o las características de los trazadores o las estructuras superficiales, entre otras. En este marco, en distintas secciones de la red de estaciones hidro-métricas de la cuenca Matanza-Riachuelo se realizará una pormenorizada evaluación de su aplicabilidad.

1.2 Velocimetría por imágenes en la Argentina

La velocimetría por imágenes, originalmente desarrollada para su uso en entornos de laboratorio, consiste en la aplicación de técnicas de correlación cruzada o de la computación gráfica en una serie de imágenes consecutivas (o fotogramas extraídos de videofilmaciones) permitiendo generar un campo de vectores de velocidad superficial del flujo (Perks et al., 2020). Lewis et al. (2018) recomiendan la metodología LSPIV para la medición de caudales utilizando VANTs (Vehículos Aéreos No Tripulados) señalando su rapidez, su bajo costo y que no requiere un trabajo preparatorio importante en la sección de observación o una amplia experiencia en el análisis de imágenes y manejo de PIV. Además, con LSPIV resulta factible de desarrollar sistemas automáticos de medición permitiendo la realización de mediciones continuas y/o la observación durante escenarios hidrológicos críticos. Estas características hacen a esta metodología atractiva en países con escasos recursos para invertir en observación hidrológica. En la Argentina, y para distintas aplicaciones (gestión de cuencas, diseño hidrológico e hidráulico, vigilancia hidrológica, etc.) esta metodología está siendo fuertemente utilizada en Córdoba (Guillén et al., 2017; Patalano et al., 2017; Guillén, 2019; Pal et al., 2021), mientras que también se presentan experiencias recientes en Tucumán (Aguirre et al., 2019; Bazzano et al., 2019), Salta (Botelli et al., 2020) y Catamarca (Lobo, 2019).

2 Estado del arte

2.1 Antecedentes

Las primeras mediciones en ríos con velocimetría por imágenes fueron realizadas en Japón, donde se destacan los trabajos pioneros de LSPIV realizados por Fujita y Komura (1994) y Fujita et al. (1998). Precisamente en este último trabajo se incorporó la sigla LSPIV, como una extensión de la metodología PIV, para la determinación de campos de velocidad del flujo que abarquen grandes áreas tanto en condiciones de campo como de laboratorio. Mostrando la versatilidad de la técnica, Fujita et al. (1998) presentaron LSPIV aplicada a tres situaciones de flujo distintas: *i)* monitoreo del proceso de aireación en un modelo físico de aliviadero de presa, *ii)* transporte de hielo en un modelo físico de una confluencia, y *iii)* flujo durante una inundación en un río en escala real. Una década más tarde, Muste et al. (2008) publicaron una revisión de LSPIV orientada a la comunidad hidrológica, en donde sintetizó su evolución y se proporcionaron ejemplos de implementación con la idea de fomentar la optimización de esta metodología y ampliar el campo de aplicación. Este trabajo puso de relieve algunas de las limitaciones de la metodología vinculadas al hecho de que la precisión de las mediciones de campo puede verse afectada por condiciones de luminosidad, de distribución de trazadores y otras situaciones adversas que podrían alterarlas estimaciones como el impacto del viento sobre la superficie libre. Con el objetivo de afianzar la técnica, a continuación, diversos grupos de trabajo avanzaron en distintos aspectos que hacen a LSPIV: Le Coz et al. (2010) evaluaron la performance de LSPIV durante inundaciones repentinas con el objetivo de mejorar la calidad de las mediciones de los caudales pico, Dramais et al. (2011) probaron un equipamiento de videofilmación móvil para poder medir durante caudales altos y fortalecer la construcción de curvas HQ, Tauro et al. (2014) trabajaron sobre la reorientación de la cámara según condiciones de luminosidad, y Le Boursicaud et al. (2016) investigaron los problemas y el potencial de aplicación de LSPIV utilizando videofilmaciones realizadas durante inundaciones, grabadas en condiciones no ideales y compartidas en sitios web públicos, entre otros. En este contexto, la forma obtención de videos para procesar y la captación de la velocidad superficial de los cursos a medir, junto con los algoritmos a aplicar, se erigen como los principales focos de análisis para mejorar la performance integral de la técnica de LSPIV. Entre otros desarrollos, para atender las limitaciones que presenta LSPIV se destacan los siguientes:

- Fujita et al. (2007) propusieron la técnica STIV (*Space-Time Image Velocimetry*) basada en el análisis de la variación temporal del brillo de la imagen en una dirección de búsqueda paralela a la del flujo. STIV es aproximadamente diez veces más rápido que LSPIV para obtener la misma cantidad de información, con la salvedad de que LSPIV es un método 2D mientras que STIV es 1D en la dirección del flujo (por ejemplo, STIV no serviría para medir recirculaciones).

- Perks et al. (2016) plantearon la utilización del algoritmo KLT (Kanade-Lucas Tomasi), proveniente de la computación gráfica, para realizar el seguimiento de particularidades presentes en la superficie de agua que se vinculan con la velocidad de la superficie libre. Este método fue implementado con videofilmaciones obtenidas con VANTs durante un evento extremo de inundación.
- Tauro et al. (2017) para responder la pregunta acerca de si conviene utilizar LS-PIV o LSPTV, investigaron la performance de ambas metodologías en cauces naturales. En este trabajo se aplicó LSPIV standard y como PTV una versión levemente modificada de PTVLab en donde se filtran las trayectorias de los trazadores. En los experimentos presentados reconocen que LSPIV subestima las velocidades mientras que PTV presenta un mejor acuerdo con las velocidades de referencia de las observaciones realizadas.
- Motivados por la robustez del algoritmo Kanade-Lucas (KL) y por su independencia de la utilización de trazadores de forma regular, Tauro et al. (2018) implementaron la técnica OTV (*Optical Tracking Velocimetry*). La metodología OTV abarca la detección automática de particularidades del flujo, su seguimiento a través del algoritmo KL, y el filtrado basado en información conocida a priori sobre la dirección del flujo. OTV fue probado en diferentes situaciones, en el caso de superficies densamente sembradas con trazadores se obtuvieron estimaciones precisas de la velocidad del flujo, y en una situación de inundación la técnica se vio afectada por la frecuencia de adquisición de imágenes obteniendo una subestimación de velocidades. Dada la robustez que presentó, OTV se recomienda para su implementación en estaciones de medición automáticas.
- La técnica SSIV (*Surface Structure Image Velocimetry*) fue propuesta por Leitão et al. (2018) con el objetivo de mejorar el desempeño de LSPIV en cursos poco profundos y con superficies de fondo impermeables (fue aplicada para analizar el escurrimiento en zonas urbanas). SSIV es una versión de LSPIV en la que se introducen mejoras con el objetivo de mitigar el impacto negativo de dos factores específicos: los reflejos y sombras en la superficie del agua y la carencia de particularidades trazables en la superficie de agua. Para el filtrado de reflejos, sombras y obstáculos inmóviles, y además mejorar la representación de las estructuras de flujo en la superficie, SSIV aplica un proceso simple de sustracción de imágenes, en el que las imágenes se restan a un promedio temporal de un conjunto de imágenes. En este desarrollo, también realizaron un análisis de sensibilidad a distintas variables como las condiciones de luminosidad, la tasa de fotogramas de los videos, la posición de la cámara, la resolución de los videos y las estimaciones de la profundidad del agua.
- En Dal Sasso et al. (2018) se realizaron simulaciones numéricas para evaluar la performance de algoritmos de seguimiento de partículas bajo diferentes condiciones buscando definir los parámetros óptimos para la utilización de LSPTV. Los resultados numéricos del flujo junto con distribuciones sintéticas de los trazadores permitieron analizar diferentes condiciones de iluminación, de velocidad del viento, y de caudal.
- Lewis et al. (2018) aplicaron LSPIV para obtener mediciones de caudal en varios puntos en Illinois (EEUU) y comparar la performance de la toma de videos desde trípodes fijos y VANTs.

Además de esta comparación, se estudió la sensibilidad de algunos parámetros de la técnica LSPIV vinculado a la longitud de los videos y la frecuencia de fotograma utilizados, y a las dimensiones de las áreas de interrogación.

- En un reciente trabajo, Dal Sasso et al. (2020) evaluaron la sensibilidad de diversos factores como la distribución de trazadores y el cambio de variables ambientales en la aplicación de las técnicas LSPIV y PTV. Analizaron la densidad de sembrado utilizando tres indicadores (partículas por pixel - ppp, forma de los trazadores y varianza espacial), demostrando ser determinantes en la precisión de los resultados obtenidos.

2.2 Revisiones actuales

Como resumen de las experiencias anteriormente mencionadas y con el objetivo de armonizar las prácticas de medición de caudales, Pearce et al. (2020) y Perks et al. (2020) analizaron de manera integral las diferentes técnicas no intrusivas basadas en análisis de imágenes utilizadas actualmente, evaluando su potencial y detallando sus principales ventajas y desventajas. Pearce et al. (2020) analizaron varias técnicas en pruebas de campo bajo condiciones de caudales bajos, densidades altas de trazadores y videofilmaciones desde VANTs. Los algoritmos de velocimetría por imágenes que utilizaron fueron los siguientes: *Large-Scale Particle Image Velocimetry* (LSPIV, según Le Coz et al. (2014) y Lewis et al. (2018)), *Large-Scale Particle Tracking Velocimetry* (LSPTV, según Tauro et al. (2016) y Dal Sasso et al. (2018)), *Surface Structure Image Velocimetry* (SSIV, según Leitão et al. (2018)), *Optical Tracking Velocimetry* (OTV, según Tauro et al. 2018), y *Kanade-Lucas Tomasi Image Velocimetry* (KLT-IV, según Perks, et al. (2016)). Los resultados destacaron que KLT-IV y SSIV fueron sensibles a la tasa de extracción de imágenes de los videos y que los cambios en el área de búsqueda de las partículas no afectan significativamente las estimaciones. Exactamente lo contrario mostraron los ensayos con OTV y LSPTV, mientras que LSPIV mostró cambios significativos respecto de ambas variables. Finalmente concluyeron que para velocidades del flujo bajas las técnicas de velocimetría por imágenes son capaces de proveer resultados como los de las técnicas tradiciones; sin embargo, LSPIV, LSPTV y OTV requieren de una adecuada calibración y determinación de parámetros respecto de lo que se necesita con KLT-IV y SSIV. Con igual criterio integrador, Perks et al. (2020) colectaron una serie de experiencias en Europa conformando un *dataset* con gran variedad de problemas, convirtiéndose en una referencia armonizadora de la aplicación de técnicas de velocimetría por imágenes. A partir de este *dataset*, libremente disponible, se pudieron comparar la performance de diferentes fuentes de captura de videos (VANTs, GoPro, cámaras fotográficas profesionales, sensores térmicos, teléfonos celulares, etc.), algoritmos y software, y parámetros comunes de procesamiento. En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de algoritmos de la medición de caudales con velocimetría por imágenes, adaptado de Perks et al. (2020), en el que se destacan las principales fortalezas y debilidades de cada uno de ellos.

Tabla 2.1. Resumen del estado de las reglas hidrométricas de las estaciones recorridas en la campaña de reconocimiento inicial.

Técnica	Ventajas	Limitaciones/requerimientos
LSPIV	<ul style="list-style-type: none"> ● Provee información completa del campo de flujo. ● Es el algoritmo más utilizado y mejor documentado. ● La forma y tamaño de las partículas no necesitan ser predefinidas. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Sensible a la temporalidad de fotogramas y área de identificación. ● Requiere superficies continuas y bien sembradas de trazadores. ● Requiere capacitación para estimaciones precisas. ● Los vectores de velocidad se asignan en el centro de la ventana de interrogación. ● Especificación del modelo de cámara.
LSPTV	<ul style="list-style-type: none"> ● Poco sensible al cambio FPS. ● Proporciona velocidades precisas en regiones con patrones superficiales escasos. ● Funciona bien en flujos impermanentes. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Sensible a cambios en el área de identificación. ● Es necesario un post procesamiento adicional para lograr resultados óptimos. ● Las formas de las partículas deben ser definidas. ● Especificación del modelo de cámara.
SSIV	<ul style="list-style-type: none"> ● Poco sensible al área de identificación. ● El usuario no necesita definir parámetros. ● Funciona bien con imágenes pobres. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Se producen pequeñas variaciones en los resultados cuando se modifica el FPS. ● Especificación del modelo de cámara.
OTV	<ul style="list-style-type: none"> ● Poco sensible al cambio de FPS. ● Poco sensible a la densidad y forma de partículas. ● Reconstruye trayectorias de trazadores. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Sensible a la longitud de las trayectorias. ● Requiere información sobre la dirección de flujo y geometría. ● No es multiplataforma. ● Especificación del modelo de cámara.
KLT	<ul style="list-style-type: none"> ● Poco sensible al área de identificación. ● Sencillo de aprender y calcular velocidades superficiales. ● Proporciona resolución subpixel de vectores de velocidad superficial / trayectoria. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Se producen pequeñas variaciones en los resultados cuando se modifica el FPS. ● Especificación del modelo de cámara. ● Falta testeo bajo condiciones hidrológicas diversas.

2.3 Software

En la actualidad se encuentran diversos grupos de investigación dedicados al análisis e implementación de la técnica de velocimetría por imágenes. Esta situación hace que sea muy dinámico al desarrollo de software, mejorando los ya existentes y generando nuevas opciones. En la

Tabla 2.2 se presenta un resumen de los softwares disponibles y sus referencias, adaptado de Pearce *et al.* (2020), en el que a partir de sus principales características se puede seleccionar qué tipo de algoritmo resulta más adecuado para atender determinado problema.

Tabla 2.2. Software disponible (adoptado de Perks *et al.*, 2020).

<i>Software</i>	<i>Prestación</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Referencia</i>
Fudaa-LSPIV	Muestreo de imágenes desde videos, ortorrectificación de imágenes, correlación cruzada, filtrado, cálculo de caudal.	Interfase de código abierto, ejecutables libres	Perks <i>et al.</i> (2020)
KLT-IV	Remoción de distorsión del lente, estabilización de imágenes y ortorrectificación, seguimiento individual de trayectorias, cálculo de caudal	Ejecutable libre	Perks (2020)
KU-STIV	Remoción de distorsiones, ortorrectificación, estabilización de imágenes, análisis de patrones en las imágenes	Software propietario	Fujita <i>et al.</i> (2007)
LSPIVapp	Calibración de la cámara, ortorrectificación de la imagen, correlación cruzada, análisis de patrones en las imágenes	App libre para Android e iOS	Tsubaki <i>et al.</i> (2011)
MAT PIV	Transformación de coordenadas de las imágenes, correlación cruzada, filtros de post-procesado	<i>Toolbox</i> de MATLAB libre	Svee y Cowen (2004)
OTV	Seguimiento individual de trayectorias y estimación promedio de la velocidad superficial	Software propietario	Tauro <i>et al.</i> (2018)
PhotrackSSIV	Ortorrectificación de imágenes, correlación cruzada, filtrado de las estructuras en la superficie libre, filtrado de resultados, estimación de caudal. Sistema de cámara independiente para medición continua (<i>DischargeKeeper</i>) o en una App de teléfonos celulares (<i>DischargeApp</i>)	Software propietario	Leitão <i>et al.</i> (2018)
PIVlab	Pre-procesamiento de imágenes, correlación cruzada directa, transformada discreta de Fourier, soluciones a escala de sub-píxel, herramientas de post-procesado	<i>Toolbox</i> de MATLAB libre	Thielicke y Stamhuis (2014)
PTVlab	Pre-procesamiento de imágenes, correlación cruzada, algoritmo de relajación, umbrales binarios dinámicos, relajación iterativa, seguimiento individual de trayectorias, herramientas de post-procesado	<i>Toolbox</i> de MATLAB libre	Brevis <i>et al.</i> (2011)
PTVStream	Seguimiento individual de trayectorias y estimación promedio de la velocidad superficial	Software propietario	Tauro <i>et al.</i> (2019)
RIVeR	Extracción de imágenes desde videos, preprocesamiento de imágenes (PIVlab o PTVlab), rectificación de velocidades, cálculo de caudal	<i>Toolbox</i> de MATLAB libre	Patalano <i>et al.</i> (2017)

3 Características de la técnica LSPIV

3.1 Metodología general

La metodología LSPIV de medición de caudales se implementa a partir de la obtención de una videofilmación estática de la superficie de un curso de agua, con una duración de registro suficiente como para obtener parámetros estadísticos representativos que permitan la evaluación del desplazamiento de estructuras de flujo y/o trazadores superficiales. Luego, la selección de fotogramas (o frames por su nombre en inglés) del video con una discretización temporal constante, permite realizar distintos tipos de procesamientos y/o análisis para obtener la velocidad superficial del flujo.

Conocida la batimetría se una sección transversal y con el campo de velocidades en superficie, asumiendo que la distribución de velocidades en la columna de agua presenta una distribución logarítmica estándar, se puede obtener interpolando el perfil en cada punto de la misma. Finalmente, con esta información se puede calcular el caudal total en la sección. En la Figura 3.1 se presenta un esquema simplificado del campo de velocidades superficiales obtenido con LSPIV y los perfiles verticales de velocidad estimados en una sección transversal conocida.

3.2 Adquisición de imágenes

La toma de los videos consiste en una etapa fundamental de la aplicación de esta técnica. Las filmaciones pueden ser ocasionales (generalmente de baja calidad) y/o planificadas. Para estas últimas se considera la posibilidad de realizarlas mediante la utilización de cámaras de video fijas (en trípodes o estructuras ad-hoc) o cámaras en VANTs (drones) (Figura 3.2).

Estas últimas presentan la ventaja de obtener una mejor toma de la zona de interés, reduciendo esfuerzos de ortorrectificación, pero en general requieren de un tratamiento de estabilización del video. Las filmaciones con cámaras resultan más sencillas de ser obtenidas, además de ser más económicas en cuanto al costo del equipamiento necesario.

La necesidad de contar con una toma sistemática de videos, que no impliquen grandes esfuerzos de preprocesado y con los que la técnica LSPIV pueda ser implementada, ha permitido desarrollar reglas y buenas prácticas a tener en cuenta al momento de las filmaciones. El CETA (Centro de Estudios y Tecnología del Agua de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina), el USGS (United States Geological Survey, Estados Unidos) y el ECCC (Environment and Climate Change Canada) han desarrollado una serie de lineamientos y recomendaciones basado en la experiencia en campo.

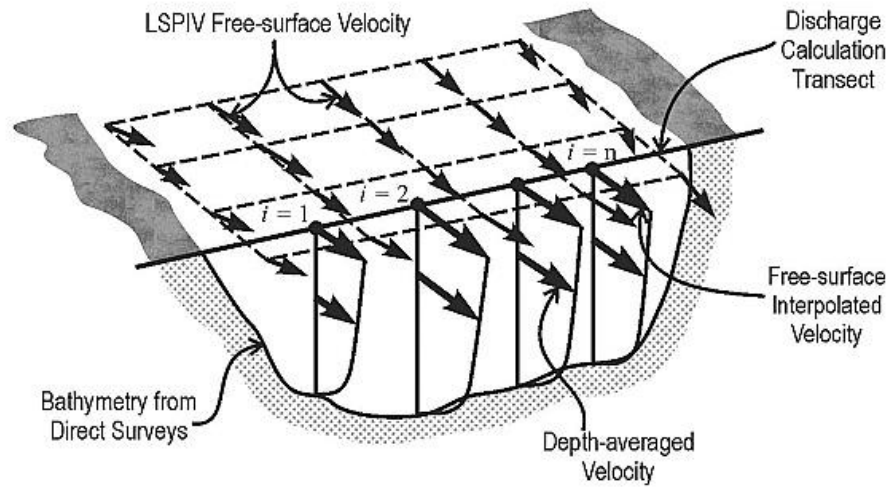


Figura 3.1. LSPIV - Esquema de velocidades superficiales observadas e interpolación en una sección transversal conocida (Muste et al., 2008).

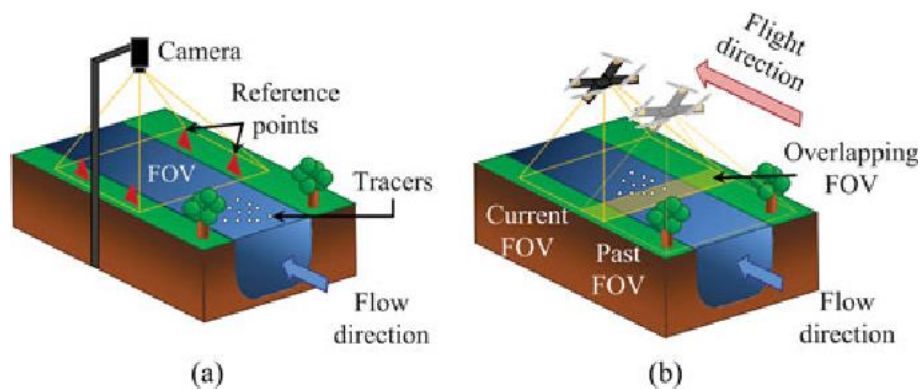


Figura 3.2. LSPIV - Esquema toma LSPIV.

Tanto las recomendaciones de USGS¹, como las de la UNC (Cazadores de Crecidas²) trabajan sobre los aspectos principales de la toma: infraestructura, ángulos, duración, sitios óptimos, etc. Un resumen de las mismas se destaca aquí:

- Evitar el uso de lentes gran angular
- Preferentemente utilizar plataformas para estabilizar la filmación.
- Filmar con una resolución mínima de 640 x 480 píxeles.
- Tratar de lograr filmaciones en las cuales el ángulo entre la cámara y la superficie del agua sea cercano a 90°.

¹ <https://my.usgs.gov/confluence/pages/viewpage.action?pageId=546865360>

² <https://www.cazadoresdecrecidas.unc.edu.ar/instructivo/>

- En caso de tomas oblicuas, se recomienda que el ángulo sea superior a 15° (el error en los resultados procesados por LSPIV aumenta a medida que el ángulo se acerca 0°).
- Asegurarse que el campo de visión contenga estructuras u objetos fijos (árboles, postes, etc.).
- Filmar en zonas donde los patrones de flujo sean uniformes.
- Las mejores secciones transversales para capturar videos son aquellas que tienen fondos estables y que no están sujetos a erosión.
- Evitar reflejos, sombras y patrones brillantes en la superficie de filmación. Se pueden usar filtros de lentes para mitigar o eliminar los reflejos de la superficie.
- Tener en cuenta los efectos de la estela turbulenta en pilas y otras perturbaciones del flujo al tomar videos desde puentes (es preferible filmar hacia aguas arriba desde un puente o desde las márgenes, dependiendo de cómo es el puente que afecte el flujo (Figura 3.3)).
- Realizar grabaciones de al menos 1 minuto para garantizar resultados de buena calidad (de ser necesario se puede muestrear el video).
- El video debe capturarse a una velocidad mínima de 15 fotogramas por segundo (FPS).
- Para flujos de alta velocidad (un aliviadero de presa, por ejemplo) se recomiendan FPS aún más altas.
- Registrar las coordenadas de ubicación del video y describir precisamente la ubicación de la medición.
- Tomar nota de la fecha y hora exacta de la grabación.



Figura 3.3. Ejemplo de videofilmación desde una margen y desde un puente (*checklist* para LSPIV del USGS)

3.3 Trazadores

Para una correcta aplicación de la técnica LSPIV, en caso de no poder registrar un flujo con patrones de escurrimiento superficiales dinámicos, es necesario contar con trazadores identificables en la superficie, de lo contrario el cálculo de velocidades no resulta con una adecuada precisión.

La selección de trazadores debe realizarse considerando una densidad similar a la del líquido y preferentemente de forma esférica. El movimiento de trazadores muy livianos puede verse afectado por la acción del viento, mientras que trazadores de densidad excesiva pueden hundirse dificultando su detección. Las partículas elegidas deben ser capaces de seguir el movimiento superficial del fluido y de no interrumpirlo.

El color de los trazadores es otra variable a tener en cuenta, ya que partículas contrastantes con el líquido permiten una mejor captación desde las videofilmaciones. En ese sentido, Dal Sasso et al. (2020) seleccionan el material a utilizar en función de las condiciones del curso de agua. En el caso de aguas claras de baja profundidad, donde los trazadores claros generan mayor contraste con respecto al fondo emplean chips de madera, mientras que en aguas turbias donde el color de la superficie es claro y homogéneo optan por utilizar carbón.

La densidad de sembrado resulta más importante que el tamaño de las partículas (Fujita et al., 1998; Muste et al., 2008; entre otros). Lograr una buena densidad de sembrado deber ser una premisa al momento de la videofilmación. Dal Sasso et al. (2020), señalando lo relevante de esta variable, proponen un indicador para cuantificarla.

Entre los materiales utilizados, además de chips de madera y carbón, pueden mencionarse micro esferas fluorescentes (Tauro et al., 2012), *ecofoam* (material biodegradable utilizado para embalaje) (Jodeau et al., 2008; Sutarto, 2015), esferas de poliestireno, avena, maíz, aserrín, etc. Se sugiere que el material elegido sea biodegradable.

3.4 Preprocesamiento

El período de preprocesamiento contempla todas las actividades necesarias a realizar sobre el video capturado y sus imágenes (fotogramas), con el objetivo de que sean utilizables en la determinación de la velocidad superficial del flujo. Entre ellas, se destacan la estabilización de videos (eliminar movimientos propios de la filmación), el muestreo o extracción de imágenes del video (elección del paso temporal de discretización del análisis) y la edición de las imágenes (editar aspectos negativos de las condiciones ambientales en los fotogramas).

3.4.1 Estabilización de videos

Cualquier movimiento que pueda tener la cámara durante la grabación, provocará desplazamientos no deseados que pueden sesgar los resultados. Estos corrimientos en las imágenes pueden cuantificarse a través de la evaluación de cambios en las posiciones de determinados píxeles en las imágenes (fotogramas). Debido a esta situación se requieren estabilizar aquellos videos en los que el desplazamiento de los píxeles debido al movimiento de la cámara sea comparable a los desplazamientos de los trazadores.

La opción de estabilización de videos resulta más utilizada cuando estos provienen de filmaciones realizadas con teléfonos celulares o desde VANTs (drones). Tanto Fudaa-LSPiV como RIVeR cuentan con herramientas de estabilización de imágenes que se mencionan en Ioli (2020).

Además, existen diversos software específicos como para realizar este tipo de tarea. En la Tabla 3.1, se presentan siete de ellos cuya performance fue comparada por Ljubicic y col. 2021.

Tabla 3.1. Software disponible para la estabilización de videos (Ljubicic et al., 2021).

<i>Software</i>	<i>Referencia</i>
FFT-CUAS	https://bitbucket.org/SIENA_Research/fishstream
FFT-DCH	https://github.com/salpeha/FFTVidStabilization
SSIMS	https://github.com/ljubicicrobert/SSIMS
KLT-IV	https://sourceforge.net/projects/klt-iv
VISION/FAST	https://doi.org/10.17605/OSF.IO/HBRF2
FlowVeloTool/AKAZE	https://github.com/AnetteEltner/FlowVeloTool
Blender	https://www.blender.org

En el caso de RIVER, el algoritmo de estabilización de imágenes vincula cada fotograma con el previo utilizando una transformación por afinidad, estimada sobre la base de los puntos de coincidencia detectados por el operador FAST (Rosten y Drummond, 2005). Específicamente en el software, el módulo de estabilización no requiere ningún tipo de configuración.

La estabilización del video en Fudaa-LSPIV consiste en la definición de un área del flujo en el primer fotograma (máscara), dentro de la cual no se buscarán puntos de interés para esta acción. La misma máscara se utiliza en el resto de los fotogramas, considerando que el video no tiene movimientos significativos. Los puntos de interés son detectados y emparejados con el operador SURF (Bay y col. 2008) y son utilizados para estimar una transformación geométrica de tipo proyectiva (homografía) entre cada fotograma con el primero. En cuanto a las especificaciones en el software, Fudaa-LSPIV presenta distintas recomendaciones para su uso y se establecen diferentes características que se deben definir:

- Modelo de transformación de imagen: *Similarity* (en caso de inestabilidad débil (<10 píxeles) o *Projective* (en caso de inestabilidad fuerte (>10 píxeles).
- Densidad de puntos de interés para el proceso de estabilización: *High, Average o Low*.
- Área del curso de agua: donde se registran patrones de movimiento (no debe ser considerada por el algoritmo de estabilización).

La selección de los parámetros anteriores dependerá del grado de inestabilidad de la cámara y de la calidad de definición de las márgenes del curso de agua: textura y contraste. Un entorno con elevado contraste, con muchos bordes y esquinas se considera de buena calidad. Una superficie lisa de hormigón se considera de mala calidad, mientras que las márgenes que contengan vegetación, rocas, árboles y sombras serán de muy buena calidad. Otro parámetro importante para considerar es la relación *bank/flow*, con la que, para asegurar una buena estabilización, las márgenes deben cubrir al menos un cuarto de la imagen a cada lado del curso de agua (aproximadamente 50 % agua y 50 % entorno).

3.4.2 Extracción de imágenes

Otro procedimiento importante durante la etapa de preprocesamiento de imágenes, y que resulta sensible en la calidad de los resultados obtenidos es la tasa de extracción de imágenes de los videos (fotogramas).

En muchos casos existen problemas asociados al seguimiento de los patrones de flujo superficial a partir de la determinación de la tasa FPS (fotogramas por segundo), que resulta en el intervalo temporal entre imágenes. Puede ocurrir que desplazamientos reales resulten demasiado pequeños (unos pocos píxeles) a la tasa FPS seleccionada y a la resolución espacial con la que se trabaja. Por lo tanto, resulta una buena práctica aumentar el intervalo de tiempo entre fotogramas (disminuyendo o submuestreando las imágenes) con el objetivo de incrementar los desplazamientos de los patrones de flujo y obtener buenos niveles de correlación.

El video de análisis puede ser submuestreado (tasa FPS menor), pero no se puede contar con una FPS mayor que la del video original (Figura 3.4). El submuestreo de fotogramas resulta especialmente útil en filmaciones donde el flujo presenta patrones de desplaza que no son observados fotograma a fotograma por los algoritmos de procesamiento, por ejemplo, el caso de videos de cursos con velocidades superficiales bajas obtenidos con una tasa FPS alta. Los procesamientos realizados a mayores tasas FPS presentan una mayor cantidad de vectores de velocidad que pueden llegar a ofrecer resultados más precisos, pero requieren del manejo de un mayor volumen de datos y mayor costo computacional.



Figura 3.4. Elección del intervalo temporal entre fotogramas para el análisis (FPS).

3.4.3 Orto-rectificación de imágenes

Para una adecuada estimación de las velocidades superficiales es necesario trabajar con ortoimágenes que corrijan los efectos de perspectiva y estén ajustadas a la escala del mundo real.

La orto-rectificación es el método de corrección del efecto de perspectiva de las imágenes, En general los algoritmos de ortorrectificación de imágenes comprenden tres etapas:

1. Localización de los puntos de referencia en tierra (GRP, Ground Reference Points)
2. Determinación de los parámetros de la transformación
3. Transformación de las imágenes

Las herramientas de orto-rectificación de imágenes, como la que ofrece Fudaa-LSPIV, incluyen transformaciones 2D, 3D y escalado (Figura 3.5). La orto-rectificación 2D es viable cuando se

cuenta con al menos 4 GRP en el mismo plano del agua y se conocen las distancias relativas entre ellos. La orto-rectificación 3D es viable cuando hay distorsión por perspectiva y se cuenta con instrumental adecuado para la determinación de las coordenadas geográficas de los puntos (como un GPS diferencial), necesitándose al menos 6 GRP para completarla. Cuando las imágenes no presentan distorsiones por perspectiva, con un escalado de metros/píxeles es suficiente como para tener una buena representación: solo conociendo la distancia real entre dos puntos se puede rectificar la imagen (método aplicable a filmaciones aéreas como en el caso de uso de VANTS).

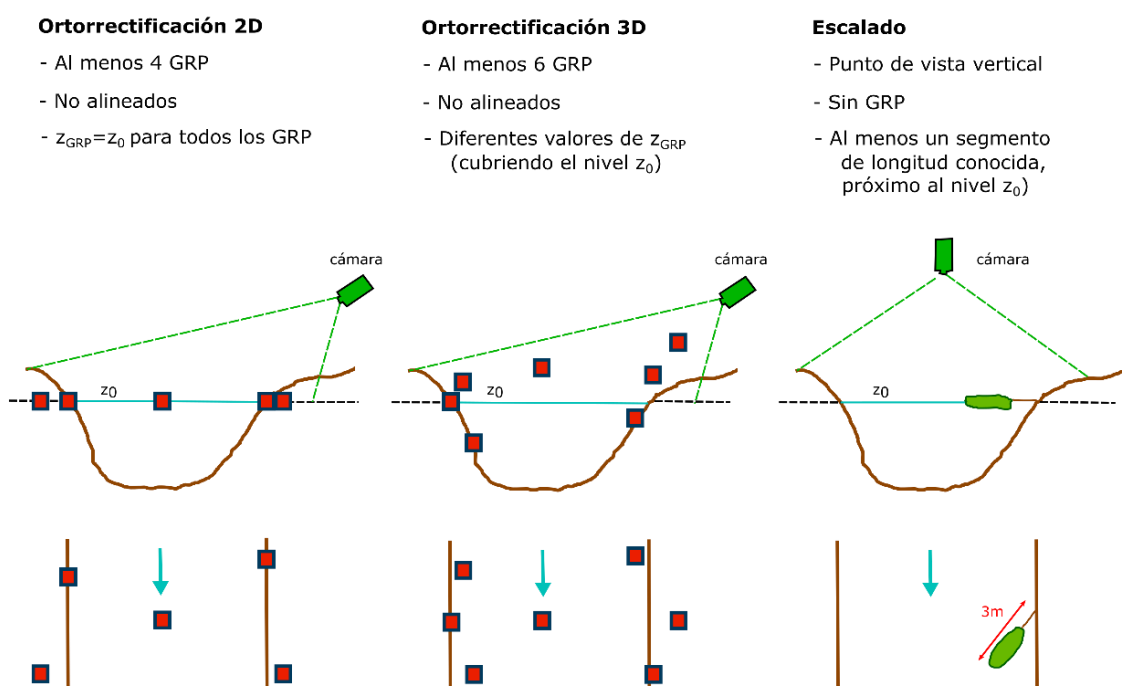


Figura 3.5. Herramientas de orto-rectificación en Fudaa-LSPiV.

3.4.4 Edición de imágenes

Las condiciones ambientales durante la toma de los videos pueden influir negativamente al momento de analizar las imágenes. Entre ellas se destacan las condiciones de iluminación, con problemas que se pueden originar por la aparición de sombras o reflejos

Para abordar esta problemática, en el caso en que realiza el sembrado de trazadores, se pueden utilizar técnicas para enfatizar el contraste entre los trazadores y la superficie del agua. En general, durante la edición de imágenes se busca aumentar los niveles de contraste e intensidad de brillo de las partículas. A modo de ilustración, en la Figura 3.6 se presentan las herramientas disponibles en PIVlab (incluido en el paquete de software RIVER). En el caso de Fudaa-LSPiV, la

edición de imágenes es automática, incluye la conversión de las mismas a escalas de grises, pero no resulta configurable.

- *Histogram equalization* (CLAHE): Mejora el contraste de las imágenes. Se optimizan regiones con baja y alta exposición (como zonas oscuras y muy luminosas). Incrementa la falta de contraste por regiones.
- *High-pass*: Suprime las bajas frecuencias como la refracción de la luz sobre el fondo.
- *Intensity capping*: Los puntos brillantes pueden sesgar la correlación en flujos no uniformes. Este filtro trabaja con un filtro que selecciona un límite superior de la intensidad en escala de grises.

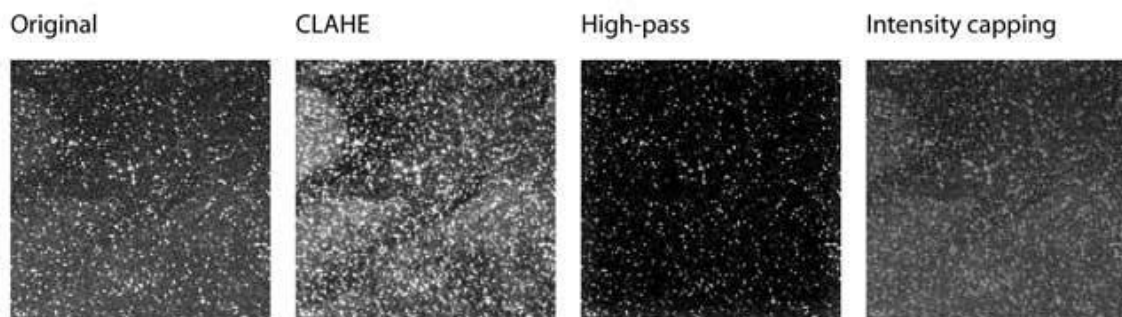


Figura 3.6. Efectos de las técnicas de edición de imágenes utilizadas en PIVLab (Thielicke y Stamhuis, 2014).

3.5 Procesamiento

3.5.1 Algoritmos de procesamiento

La estimación de las velocidades superficiales del flujo, en el marco de la etapa de procesamiento de imágenes, resulta posible utilizar una variedad de algoritmos de acuerdo al software que se utilice. En RIVeR, utilizando la aplicación PIVLab, es posible seleccionar entre los algoritmos DCC (*Direct Cross Correlation*), DFT (*Discrete Fourier Transform*) o EC (*Ensemble Correlation*). En Fudaa-LSPIV se utiliza el algoritmo DCC (*Direct Cross Correlation*).

3.5.1.1 Algoritmo DCC

La correlación cruzada directa (DCC, *Direct Cross Correlation*) es el método de análisis de imágenes proveniente de aplicaciones de la técnica PIV. Este método determina el desplazamiento medio de grupos de partículas contenidas en pequeñas regiones conocidas como ventanas de interrogación (IA, *interrogation area*), las cuales se distribuyen como una malla uniforme sobre la imagen dentro de un área de búsqueda (SA, *searching area*) (Figura 3.7).

El objetivo consiste en obtener, repetidamente para diferentes tiempos, la correlación de cada una de las IA de un fotograma con las del siguiente. El procedimiento consiste en sumar la

cantidad de píxeles solapados entre las distintas IA analizando las superposiciones de mayor similitud de un fotograma con el otro.

Una vez aplicado el proceso de correlación cruzada sobre todas las IA se obtiene, para cada una de ellas, una matriz que indica el desplazamiento medio de las partículas. El máximo absoluto representa el desplazamiento promedio de las partículas en esa IA, permitiendo a través de las coordenadas del mismo cuantificar el desplazamiento de las partículas en píxeles. Conociendo además el intervalo de tiempo entre fotogramas y el factor de escala utilizado, es posible determinar la velocidad local del flujo en cada ventana, aportando a la conformación del campo superficial de velocidades.

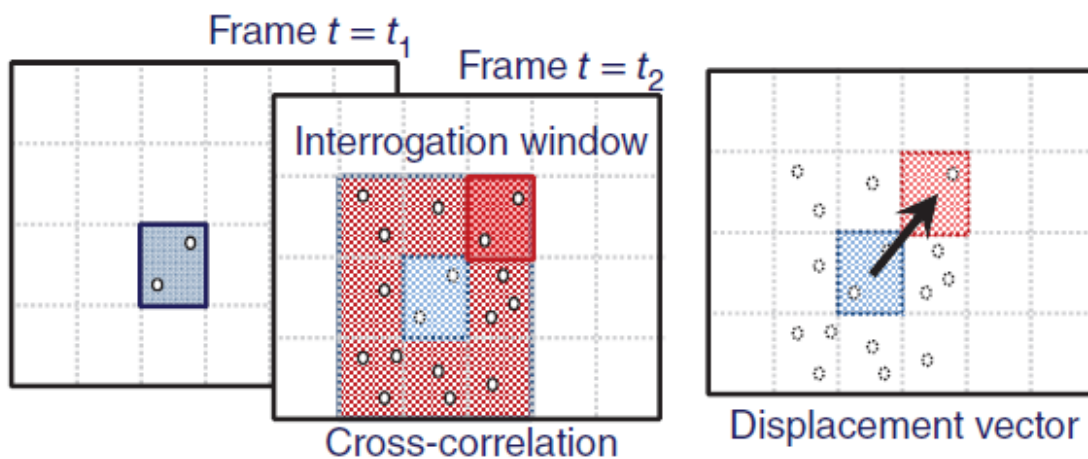


Figura 3.7. Esquema del algoritmo de correlación cruzada: fotogramas (frames) y ventana de interrogación (interrogation window) (Tauro, 2016).

El tamaño de las IA determina la discretización de la imagen y, por consiguiente, el número total de vectores de velocidad superficial resultantes. Si bien las IA pequeñas aumentan la resolución y el detalle en la descripción del flujo, pueden afectar negativamente la validez de los resultados dada la posibilidad de que se encuentren cero o muy pocas partículas, imposibilitando la realización de la correlación con el segundo fotograma y generando vectores erróneos.

El tamaño de la SA debería ser lo suficientemente grande como para abarcar el desplazamiento de partículas entre fotogramas, es decir, incluir el patrón encerrado por la IA una vez desplazado. De otra forma, se produce una pérdida de información, lo cual introduce ruido en la matriz de correlación. Además, la SA debería ser alargada hacia la dirección del flujo.

El costo computacional puede ser una variable importante en la aplicación de este algoritmo, dependiendo de los tamaños de las IA y la SA. La recomendación que se realiza en Fudaa-LSPIV es que las IA tengan un tamaño de 30 píxeles.

3.5.1.2 Algoritmo DFT

La principal desventaja del algoritmo DCC, el alto costo computacional, se puede resolver calculando la matriz de correlación en el dominio de frecuencia usando la transformada rápida de Fourier (FFT, por su sigla en inglés). Esta estrategia constituye el algoritmo DFT (*Discrete Fourier Transform*), que utiliza IA de igual tamaño, por lo que cada desplazamiento de partículas puede inducir alguna pérdida de información incorporando ruido en la matriz de correlación. Esta situación puede complicar la detección del pico de intensidad y reduce la precisión. Por lo tanto, resulta aconsejable reducir el desplazamiento a aproximadamente una cuarta parte de la IA. Ilustrando esta situación, en la Figura 3.8, se observa que con el algoritmo DCC el ruido de fondo no aumenta hasta un desplazamiento de 32 píxeles, mientras que con el algoritmo DFT, el ruido de fondo aumenta inmediatamente si el desplazamiento es mayor de 0 píxeles.

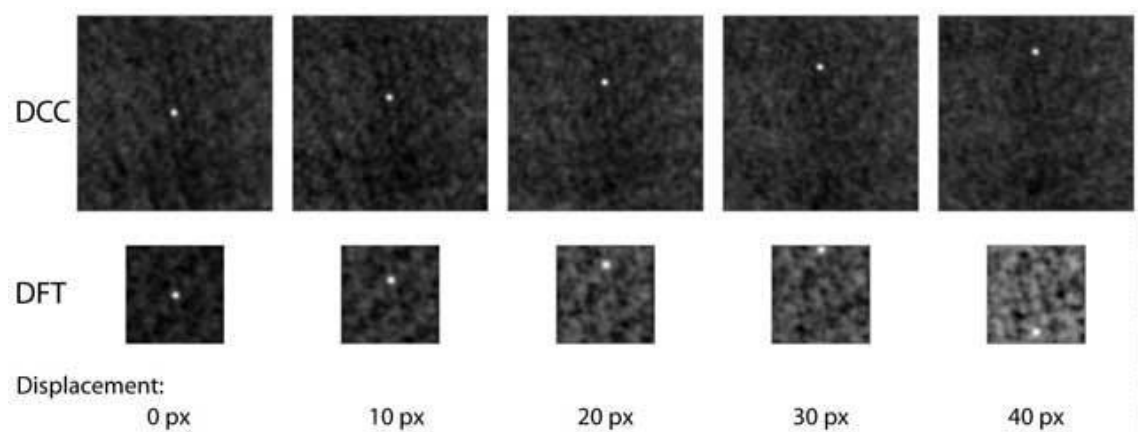


Figura 3.8. Matrices de correlación utilizando los algoritmos DCC y DFT según desplazamientos detectados (Thielicke y Stamhuis 2014).

La desventaja del ruido en la matriz de correlación puede compensarse ejecutando varias pasadas del algoritmo DFT en el mismo conjunto de datos (Thielicke y Stamhuis 2014). La cuadrícula de interrogación se puede refinar con cada pasada, lo que produce una alta resolución espacial en el mapa vectorial final, junto con un alto rango de velocidad dinámica y una relación señal/ruido óptima.

3.5.1.3 Algoritmo EC

El algoritmo EC (*Ensemble Correlation*) es comúnmente utilizado en micro-PIV (el software PIVlab lo incluye entre sus opciones), problemas con baja densidad de siembra o siembra no homogénea. El beneficio del algoritmo EC es que la búsqueda del pico de correlación está precedida por matrices de correlación promediadas de una secuencia de fotogramas (Strelnikova et al., 2020). Como resultado de esta metodología, la densidad de imagen efectiva aumenta proporcionalmente al número de fotogramas que se analicen en la secuencia.

Dado el carácter estacionario del flujo dentro de cada IA durante el tiempo de grabación de video, es posible promediar los resultados de LSPIV en la secuencia de fotogramas analizados, lo que

indica que el uso del algoritmo EC en este caso podría ser ventajoso (Strelnikova et al., 2020). Sin embargo, el algoritmo EC como herramienta para la identificación de desplazamiento no ha encontrado una amplia aplicación con LSPIV, probablemente debido al hecho de que para su aplicación se requieren largas secuencias de fotogramas.

3.5.2 Rectificación de resultados

Una alternativa a la orto-rectificación de imágenes consiste en la rectificación de resultados. Esta técnica es la que se ofrece desde el software RIVeR (Patalano et al., 2017) (Figura 3.9). La rectificación de los resultados, en vez de hacerlo con las imágenes, no requiere un alto costo computacional concentrándose este tiempo en el procesamiento PIV o PTV.

Para su implementación, se relaciona directamente el sistema de coordenadas del mundo real con su proyección bidimensional en las imágenes. Se supone que la superficie del agua del área de interés representa el plano que se rectificará. Este plano no requiere ser horizontal, contemplándose casos en los que se pueda contabilizar una pendiente del mismo.

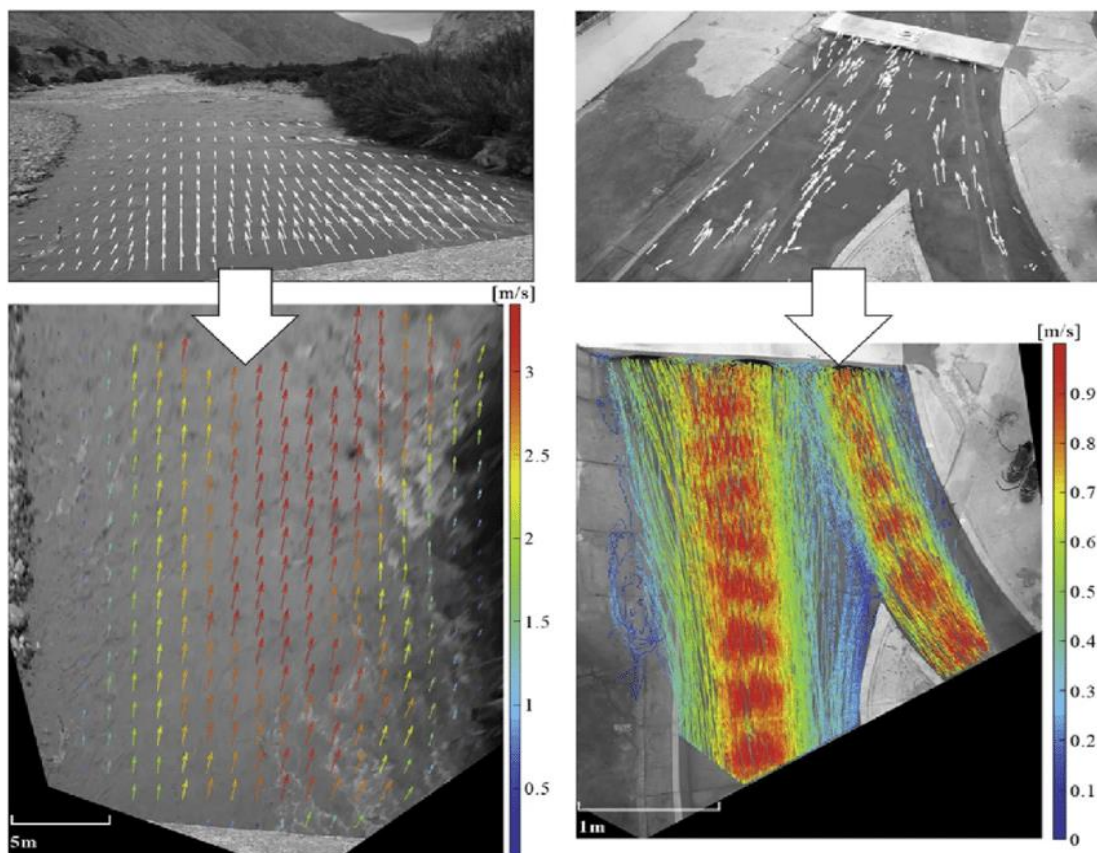


Figura 3.9. Rectificación de resultados de análisis LSPIV y LSPTV utilizando RIVeR (Patalano et al., 2017).

3.5.3 Relación velocidad superficial - velocidad media

En el proceso de cálculo de caudal, dado que la velocidad superficial en un curso de agua resulta representativa de la velocidad promediada en la vertical, resulta necesario determinar el coeficiente que relaciona a ambos valores (Figura 3.10). Este coeficiente depende de la forma del perfil vertical de velocidades y de la geometría de la sección (relación de aspecto: ancho sobre radio hidráulico) y, según (Muste et al., 2008), además se ve afectado por los números de Froude y Reynolds y la micro y macro rugosidad de fondo.

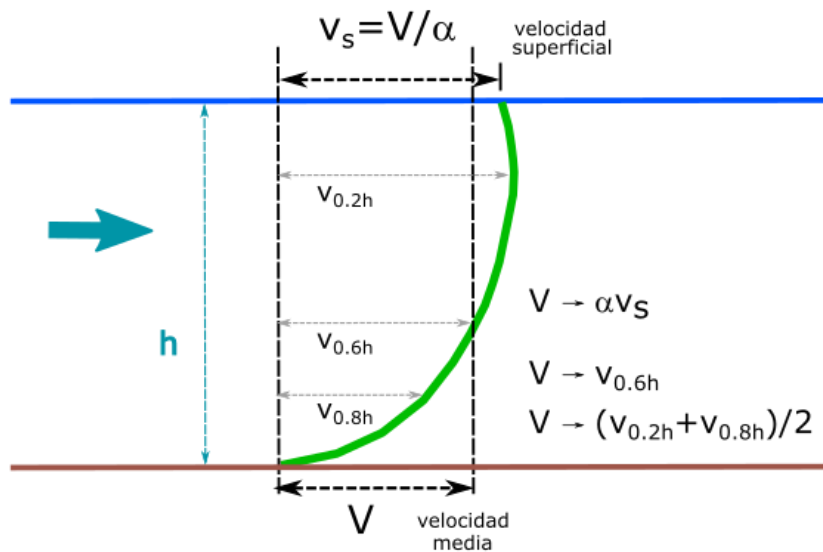


Figura 3.10. Perfil vertical de velocidad.

En flujos uniformes suele adoptarse por defecto el valor de $\alpha=0.85$. En la literatura se encuentran reportados diferentes valores, Bandini et al. (2021) resumen los diferentes coeficientes encontrados en la literatura, que se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resumen de coeficientes utilizados en la literatura (adoptado de Bandini et al., 2021).

α	Referencias	Observaciones
0.72 - 0.79	Jodeau et al. (2008); Dramais et al. (2011)	valores significativamente más bajos que el habitualmente utilizado 0.85
0.55	Genç et al. (2015)	estimado en arroyos - valor significativamente más bajo que el habitualmente utilizado 0.85
> 0.90	Le Coz et al. (2010)	valores utilizados en secciones profundas
0.88 - 0.89	Stumpf et al. (2016)	valores más altos que los esperables para los arroyos de bajas profundidades (menos de 0.5 m) que midieron - justifican estos valores debido a que la alta rugosidad impidió la formación de

		perfiles de velocidad logarítmicos en profundidades de flujo poco profundas
~ 0.80	Hauet et al. (2018)	valores que presentan pequeñas dispersiones (los percentiles 5 y 95 toman valores de alrededor de 0.7 y 0.9)

Quienes profundizaron en el estudio de este coeficiente, analizando 3611 mediciones en 176 estaciones de observación en Francia, fueron Hauet et al. (2018). El valor medio de que hallaron es de 0.8, levemente menor que el generalmente utilizado de 0.85, lo que se explica por las características medias de los ríos estudiados: radio hidráulico menor que 0.4 m y ancho de 13 m. Establecieron una relación de con la profundidad, encontrando que aumenta a mayor radio hidráulico. Para casos de aguas poco profundas ($0 < R_h < 1$ m) el valor de es cercano a 0.8 y aumenta hasta valores alrededor de 0.9 para radios hidráulicos de 5 m, siguiendo una tendencia lineal. La relación de con la rugosidad de fondo no se ve tan clara.

Como resultado de este trabajo, Hauet et al. (2018) plantean reglas prácticas para la determinación del coeficiente para su uso en velocimetría por imágenes:

Cursos naturales

- Para profundidades menores a 2 m es recomendable el uso de $\alpha=0.8$ con una incertidumbre de $\pm 15\%$ a un 90 % de nivel de confianza.
- Para profundidades mayores, es recomendable un $\alpha=0.9$ con una incertidumbre de $\pm 15\%$ a un 90 % de nivel de confianza.

Canales artificiales

- Considerar el uso de $\alpha=0.9$ con una incertidumbre de $\pm 15\%$ a un 90 % de nivel de confianza.

3.6 Postprocesamiento

3.6.1 Filtros

La identificación y eliminación de los valores atípicos (*outliers*) en los campos de velocidad es un paso crucial en la velocimetría por imágenes debido a la gran cantidad de vectores espurios que pueden ser erróneamente detectados (por ejemplo, debido a errores en el análisis de correlación, rectificación residual de errores, cambios en la condición de iluminación y presencia de sombras, movimientos aparentes o reales de objetos ajenos al flujo de agua, etc.) (Ioli 2020). Por lo tanto, para detectar y remover vectores que no resultan consistentes con el flujo, se deben utilizar filtros de postprocesamiento.

En el caso de PIVLab, se cuenta con una serie de metodologías para la eliminación de vectores espurios, como el uso del desvío estándar y la mediana, entre otros. Otra herramienta disponible

consiste en un diagrama de dispersión de velocidades en V_x y V_y a partir del cual se pueden seleccionar los vectores que se presentan por agrupamientos de manera visual (Figura 3.11).

En el software Fudaa-LSPIV las herramientas de filtrado incluyen el establecimiento de límites de velocidad en los ejes V_x y V_y , y la definición de límites del coeficiente de correlación de vectores por ventana de interrogación.

La aplicación de filtros resulta sensible a los resultados en el cálculo de caudal.

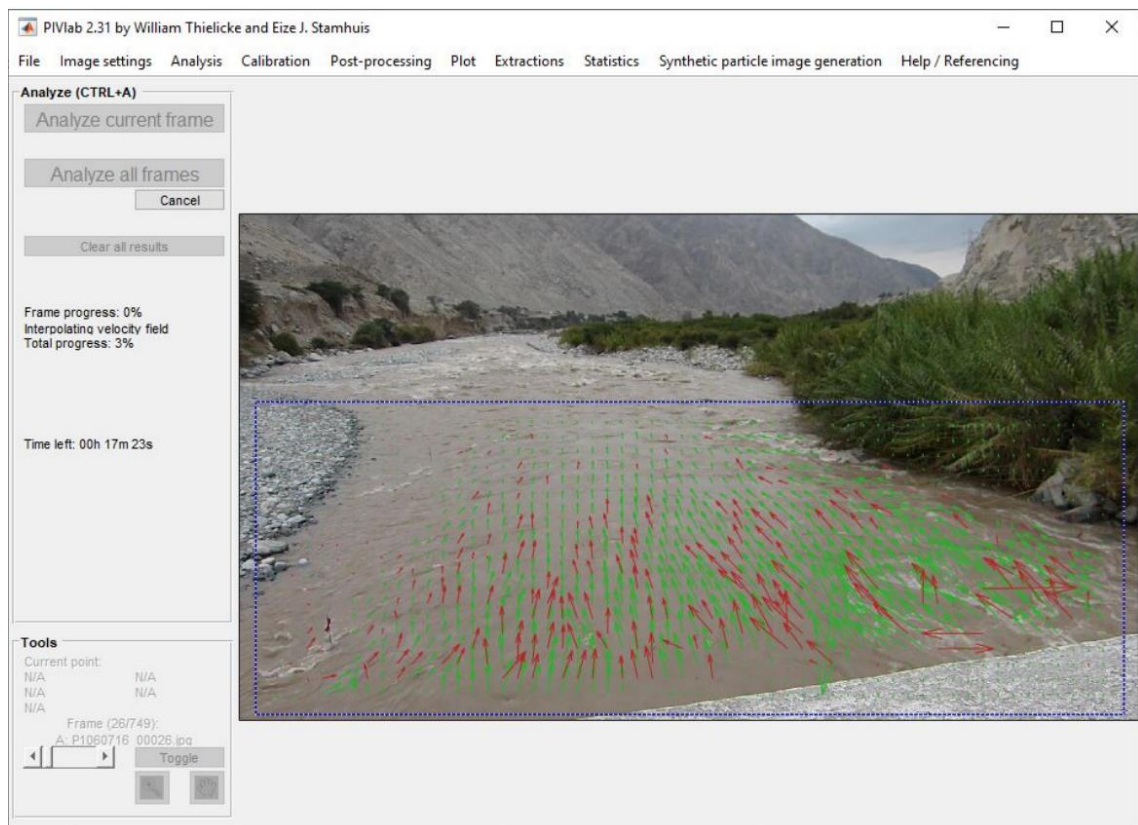


Figura 3.11. Análisis de vectores velocidad (PIVLab, RIVER User Manual, 2020).

4 Aplicación de la técnica LSPIV

4.1 Características de procesamiento

Con el objetivo de aplicar y poner en práctica la técnica LSPIV, se realizó el procesamiento de videos que conforman distintos datasets de libre disponibilidad. Estos conjuntos de datos, además de los videos o fotogramas orto-rectificados, contienen posiciones de puntos de control, datos batimétricos y caudales medidos con otros instrumentos.

Los videos disponibles, dependiendo de su resolución espacial y temporal, fueron trabajados con duraciones dentro del intervalo 5-15 segundos. Este criterio se basó en la posibilidad de contar con una cantidad de imágenes suficientes para una correlación adecuada y en la optimización del costo computacional. La determinación de cada ventana temporal de análisis se realiza de acuerdo a que la filmación debe presentar buenas condiciones, evitando movimientos bruscos y considerando un buen tránsito de trazadores en caso de que sean utilizados.

Para la selección de parámetros de cada uno de los 16 videos procesados se siguieron criterios generales que se ajustaron a cada caso en particular. Las principales variables de ajuste resultaron la tasa de extracción de imágenes (FPS), la relación velocidad media - velocidad superficial (α) y el tamaño de las áreas de interrogación (IA)

La tasa FPS estuvo condicionada a las características de los videos originales, submuestreandose en los casos necesarios donde la correlación no era óptima, por no captar los patrones generales de desplazamiento.

En la determinación del coeficiente se usó el valor por defecto de 0.85, y se ajustó a valores mayores en caso de situaciones de caudales altos o en cursos de agua de poca profundidad.

La elección del tamaño de las IA se basó en los valores recomendados en cada software: a) 30 píxeles en el caso de Fudaa-LSPIV (el área de búsqueda se determinó a partir de éste buscando que sea alargado hacia la dirección del flujo y sea capaz de captar el movimiento de partículas, algoritmo DCC), b) dos pasadas con PIVLab-RIVeR: Pass 1: 128 x 64 píxeles y Pass 2: 64 x 32 píxeles (algoritmo DFT). Estos valores fueron ajustados en cada caso de acuerdo a la resolución espacial de las imágenes originales disponibles.

4.2 Ejercicios de aplicación

Con el objetivo de avanzar en el manejo de la técnica LSPIV, se replicaron los ejercicios que se ofrecen en diversos manuales y datasets con la idea de armonizar el uso de la metodología. Los ejercicios disponibles corresponden a las siguientes iniciativas:

- Manual del usuario de Fudaa-LSPIV
- Manual del usuario de RIVeR
- Challenge educativo de IRSTEA (Francia) para Fudaa-LSPIV
- Cursos de velocimetría por imágenes (UNC, Córdoba, Argentina)
- Dataset disponibilizado por Perks et al. (2020), proyecto HARMONIOUS (*Harmonisation of UAS techniques for agricultural and natural ecosystems monitoring*)

A continuación, se realiza un análisis pormenorizado de cada ejercicio, ensayando distintas opciones de procesamiento y comparando con caudales objetivo medidos con otras técnicas.

4.2.1 Video tutorial Fudaa-LSPIV

Este video corresponde al manual del usuario de Fudaa-LSPIV. Para este ejercicio se cuenta con un caudal objetivo: $33.09 \text{ m}^3/\text{s}$ obtenido mediante la aplicación de Fudaa-LSPIV. Además del video completo, se cuenta con la información adicional sobre puntos de control y la batimetría.

Los resultados del procesamiento con Fudaa-LSPIV y PIVLab-RIVeR se presentan en la Tabla 4.1. En la Figura 4.1 se muestran algunos de los procesamientos de velocidades superficiales. En general, estos resultados fueron sensibles a la definición de las IA (área de interrogación) con el software Fudaa-LSPIV, dado que oscilaron entre 32 a $38 \text{ m}^3/\text{s}$ para valores de IA de 20 a 40 píxeles.

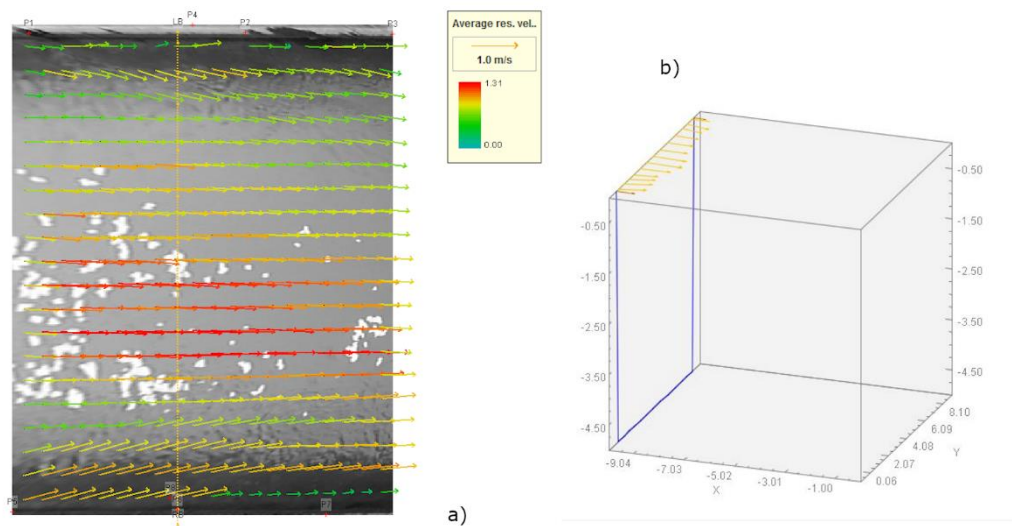


Figura 4.1. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) PIVLab-RIVeR.

Tabla 4.1. Características del procesamiento. Video tutorial Fudaa-LSPiV. Caudal objetivo: 33.09 m³/s.

Ejercicio	1_F	1_R
Software	Fudaa-LSPiV	RIVeR
Caudal [m ³ /s]	33.00	33.64
FPS	30	30
Tiempo [seg]	10 a 25	10 a 25
Paso temporal [seg]	0.03	0.03
Video estabilizado	NO	NO
α	0.85	0.85
IA [pixel]	30	p1:128x64 p2:64x32
SA [pixel]	4,4,8,8	-

4.2.2 Video tutorial RIVeR

Se analizó el video de ejemplo del manual del usuario de RIVeR. Además de la videofilmación completa, se contó con la información sobre puntos de control y batimetría. El caudal objetivo fue de 1.39 m³/s y fue obtenido utilizando la técnica LSPiV. Los resultados del procesamiento se presentan en la Tabla 4.2 y se ilustran resultados en la Figura 4.2.

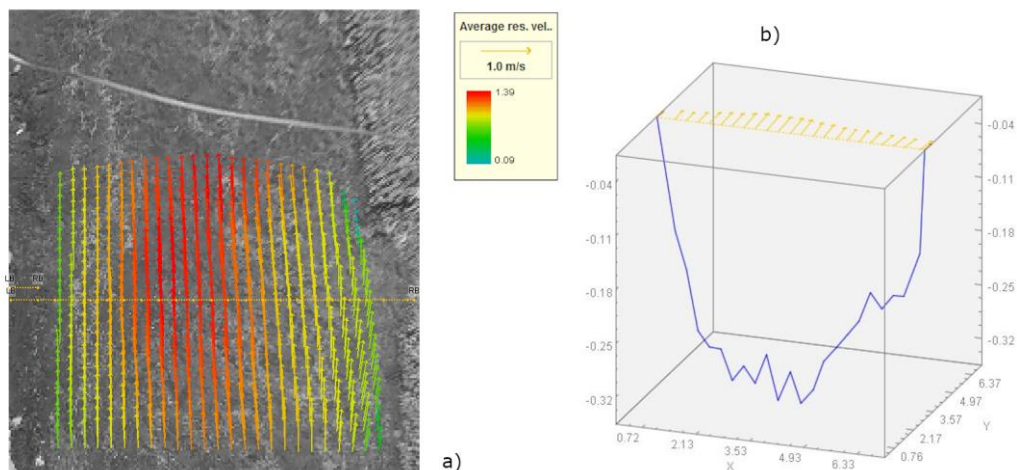


Figura 4.2. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPiV, b) RIVeR.

Tabla 4.2. Características del procesamiento. Video tutorial RIVeR. Caudal objetivo: 1.39 m³/s.

Ejercicio	2_F	2_R
Software	Fudaa-LSPIV	PIVLab-RIVeR
Caudal [m ³ /s]	1.63	1.68
FPS	30	30
Tiempo [seg]	10 a 25	10 a 25
Paso temporal [seg]	0.03	0.03
Video estabilizado	NO	NO
α	0.85	0.85
IA [pixel]	30	p1:128x64 p2:64x32
SA [pixel]	0,6,6,6	-

4.2.3 Video 1 del Challenge FUDAA

El Challenge Fudaa-LSPIV consiste en una serie de 8 videos que son utilizados para cursos de la aplicación de este software, que se encuentran disponibles libremente en la web. En este apartado se analiza el video 1 de este Challenge. Se cuenta con el video completo, la posición de los puntos de control y los datos batimétricos. El caudal objetivo fue obtenido con mediciones con ADCP y su valor es 1.26 m³/s.

En la Figura 4.3 se presentan algunos resultados del procesamiento, y en la Tabla 4.3 se resume la totalidad de ensayos realizados.

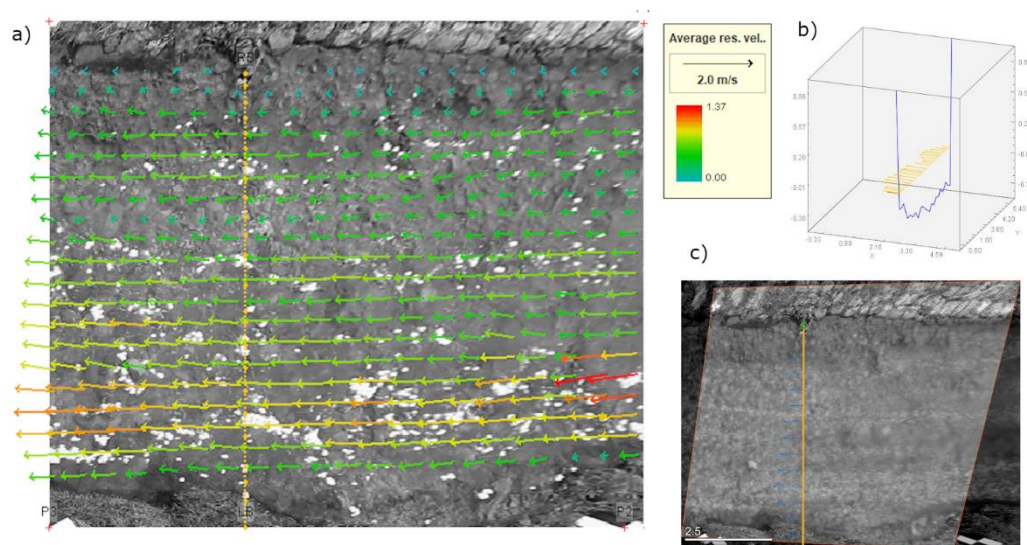


Figura 4.3. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV, c) PIVLab-RIVeR.

Tabla 4.3. Características del procesamiento. Video 1 del desafío Fudaa-LSPIV. Caudal objetivo: 1.29 m³/s.

<i>Ejercicio</i>	<i>3_F1</i>	<i>3_F2</i>	<i>3_F3</i>	<i>3_R</i>
<i>Software</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>RIVeR</i>
<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>0.95</i>	<i>0.95</i>	<i>1.19</i>	<i>0.87</i>
<i>FPS</i>	<i>25</i>	<i>25</i>	<i>25</i>	<i>25</i>
<i>Tiempo [seg]</i>	<i>20 a 30</i>	<i>26 a 31</i>	<i>20 a 30</i>	<i>20 a 30</i>
<i>Paso temporal [seg]</i>	<i>0.04</i>	<i>0.04</i>	<i>0.04</i>	<i>0.04</i>
<i>Video estabilizado</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>
<i>α</i>	<i>0.85</i>	<i>0.85</i>	<i>0.85</i>	<i>0.85</i>
<i>IA [pixel]</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>p1:128x64 p2:64x32</i>
<i>SA [pixel]</i>	<i>20,20,35,15</i>	<i>10,10,30,10</i>	<i>20,20,35,15</i>	<i>-</i>

En el ejercicio 3_F3, se aplicó un filtro de postprocesamiento dado que en el área de búsqueda se observa un sector de la sección con pocos trazadores y reflejo del fondo. Esta herramienta permitió filtrar vectores velocidad espurios, en el rango -0.6 a -3 m/s en la dirección V_x y -0.1 a 0.1 m/s en la dirección V_y.

4.2.4 Video 2 del Challenge FUDAA

El video 2 del Challenge Fudaa-LSPIV fue analizado, utilizando dos caudales objetivo: uno observado con ADCP (107.95 m³/s) y otro aplicando Fudaa-LSPIV (103.98 m³/s). Los datos adicionales para este procesamiento son las posiciones de los puntos de control y la batimetría.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.4 y la Tabla 4.4.

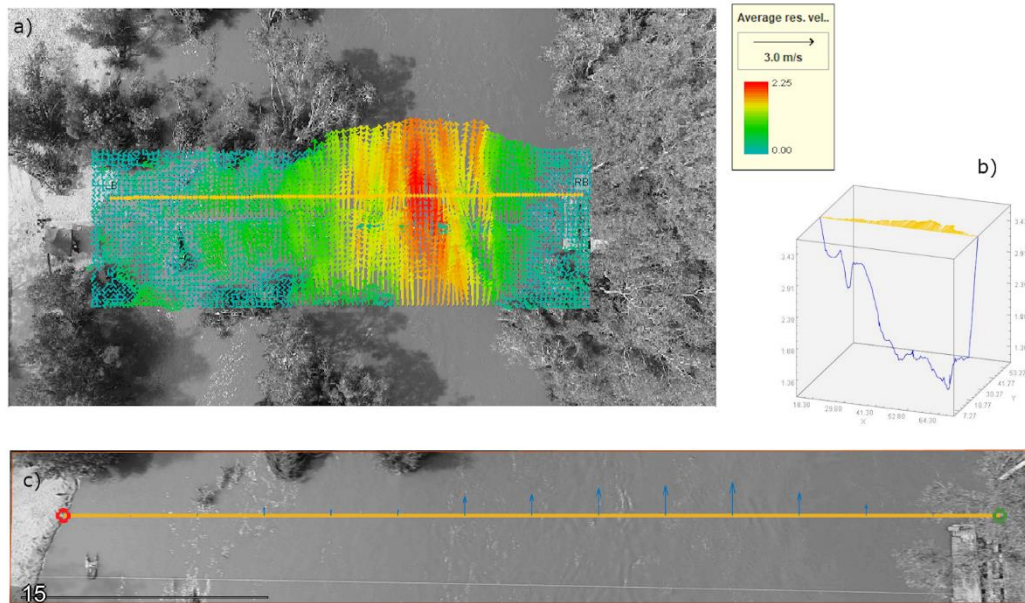


Figura 4.4. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV y c) PIVLab-RIVeR.

Tabla 4.4. Características del procesamiento. Video 2 del desafío FUDAA. Caudal objetivo: 103.98 m³/s.

Ejercicio	4_F1	4_F2	3_F3	3_R
Software	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	RIVeR
Caudal [m ³ /s]	83.34	78.65	101.25	89.07
FPS	30	30	10	10
Tiempo [seg]	5 a 15	10 a 15	0 a 15	0 a 15
Paso temporal [seg]	0.3	0.3	0.10	0.10
Video estabilizado	SI	NO	NO	NO
α	0.85	0.85	0.85	0.85
IA [pixel]	20	20	50	p1:100x50 p2:50x25
SA [pixel]	0,20,3,3	5,15,5,5	0,20,3,3	-

En el ejercicio 4_F3, a partir de las sugerencias realizadas por Jerome Le Coz (referente del proyecto Fudaa-LSPIV, comunicación directa), para este procesamiento el video fue submuestreado utilizando una tasa de extracción de imágenes de 10 FPS. También en este ejercicio se realizó un filtrado de velocidades (-1.00 a 1.00 m/s en V_x y 0.10 a 5.00 m/s en V_y). El interpolado de vectores se hizo de 3 m (R_x) x 2 m (R_y).

4.2.5 Video 3 del Challenge FUDAA

El video 3 del Challenge Fudaa-LSPIV fue analizado, utilizando un caudal objetivo estimado aplicando Fudaa-LSPIV: 52.79 m³/s. Los datos adicionales para este procesamiento son las posiciones de los puntos de control y la batimetría.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.5 y la Tabla 4.5.

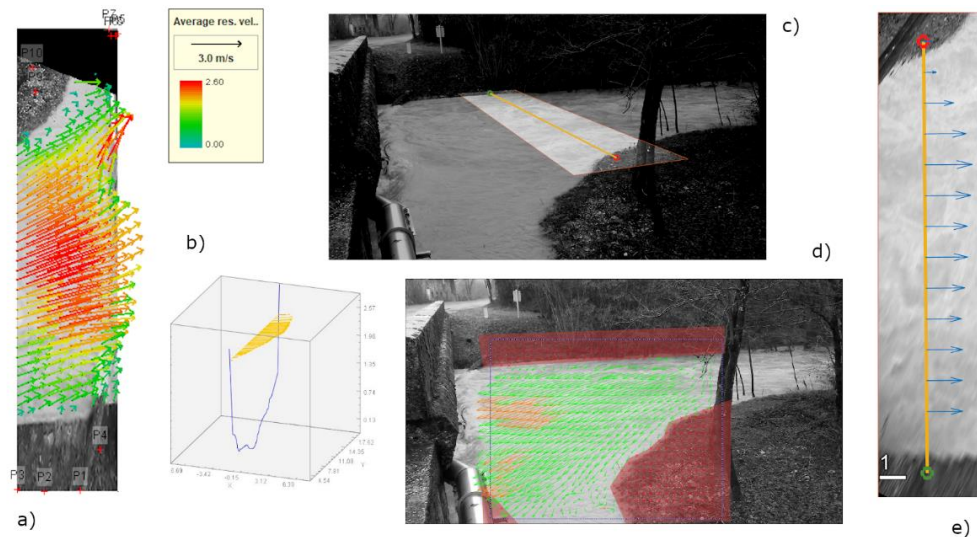


Figura 4.5. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV, c) PIVLab-RIVeR, d) PIVLab-RIVeR, y e) PIVLab-RIVeR.

Tabla 4.5. Características del procesamiento. Video 3 del desafío FUDAA. Caudal objetivo: 52.79 m³/s.

Ejercicio	5_F1	5_F2	5_F3	5_F4	5_R1	5_R2
Software	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV		RIVeR	RIVeR
Caudal [m ³ /s]	44.27	45.34	39.01		51.08 40.17 45.25	
FPS	30	30	10		10	
Tiempo [seg]	5 a 15	10 a 15	0 a 15		0 a 15	
Paso temporal [seg]	0.3	0.3	0.10		0.10	
Video estabilizado	SI	NO	NO		NO	
α	0.85	0.85	0.85		0.85	
IA [pixel]	20	20	50		p1:100x50 p2:50x25	
SA [pixel]	0,20,3,3	5,15,5,5	0,20,3,3		-	

4.2.6 Video 4 del Challenge FUDAA

El video 4 del Challenge Fudaa-LSPIV fue analizado, utilizando un caudal objetivo estimado aplicando Fudaa-LSPIV: 130.39 m³/s. Los datos adicionales para este procesamiento son las posiciones de los puntos de control y la batimetría.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.6 y la Tabla 4.6.

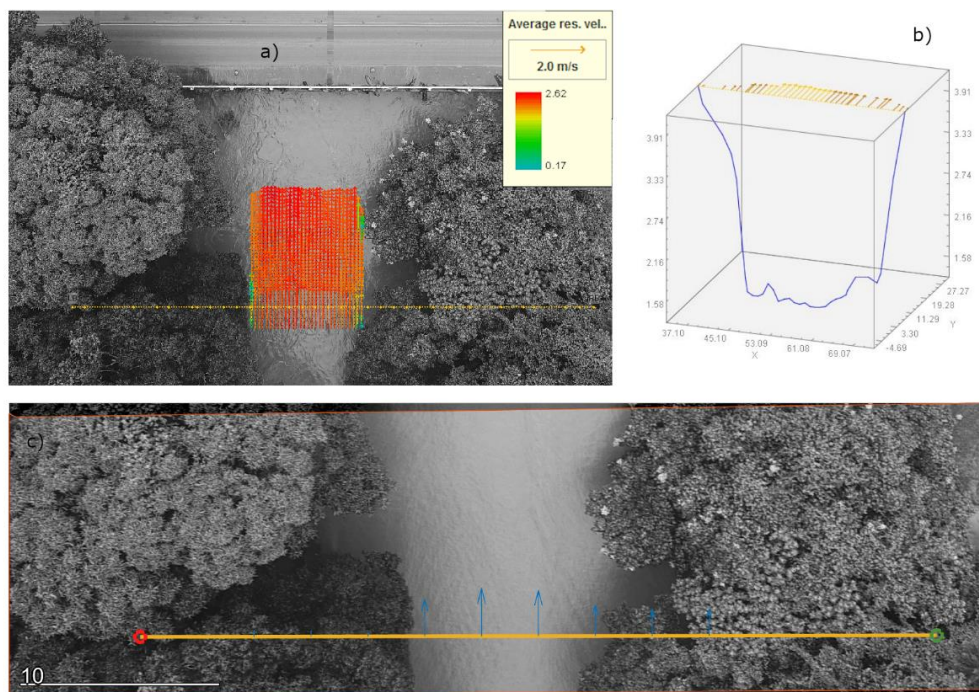


Figura 4.6. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV, c) PIVLab-RIVER.

Tabla 4.6. Características del procesamiento. Video 4 del desafío FUDAA. Caudal objetivo: 130.39 m³/s.

Ejercicio	6_F1	6_F2	6_F3	6_F4	6_R
Software	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	RIVeR
Caudal [m ³ /s]	148.08	88.93	52.52	140.63	110.75
FPS	30	30	30	30	30
Tiempo [seg]	0 a 5	1 a 6	5 a 10	0 a 5	0 a 5
Paso temporal [seg]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Video estabilizado	SI	NO	NO	NO	NO
α	0.91	0.85	0.91	0.85	0.85
IA [pixel]	30	30	30	26	p1:128x64 p2:64x32
SA [pixel]	15,30,20,20	0,4,1,1	5,5,5,10	5,30,15,15	-

En el ejercicio 6_F1 el cálculo se hace sobre un tercio de la sección total. Se evitó armar un grillado cercano a árboles para desestimar vectores pequeños que condicionen la extrapolación de vectores a zonas no medidas. Además, Solo modificando el alfa por el valor recomendado se alcanza un valor de 138.32 m³/s (+6.07 % con respecto al caudal objetivo).

En 6_F2 y 6_F3 la grilla considerada incluía árboles

En 6_F4 el procesamiento hecho a partir de parámetros recomendados.

En 6_R no interpola adecuadamente las zonas no calculadas.

4.2.7 Video 5 del Challenge FUDAA

El video 5 del Challenge Fudaa-LSPIV fue analizado, utilizando un caudal objetivo estimado aplicando Fudaa-LSPIV: 18.67 m³/s. Los datos adicionales para este procesamiento son las posiciones de los puntos de control y la batimetría.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.7 y la Tabla 4.7.

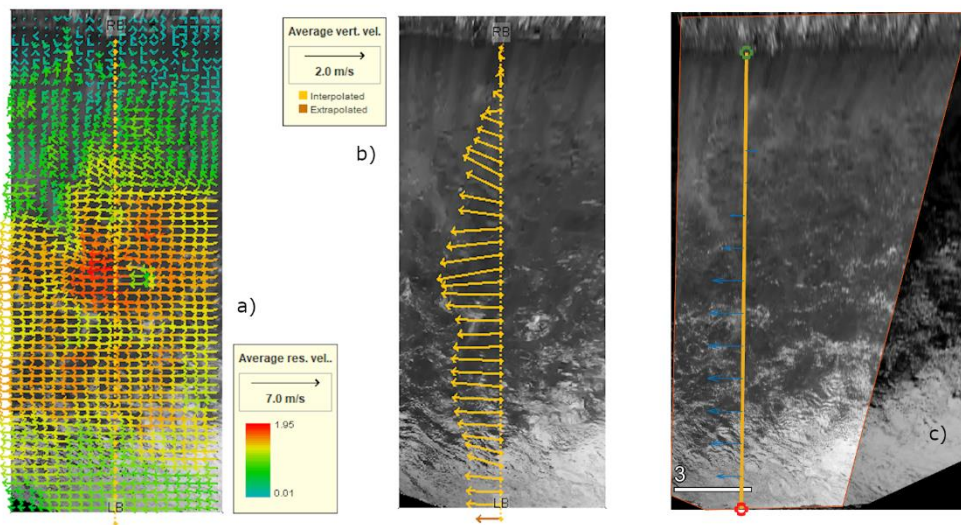


Figura 4.7. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV, c) PIVLab-RiVER.

Tabla 4.7. Características del procesamiento. Video 5 del desafío FUDAA. Caudal objetivo: 18.67 m³/s.

Ejercicio	6_F1	7_F2	7_F3	7_R
Software	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	RiVER
Caudal [m ³ /s]	17.40	13.00	16.70	15.08
FPS	30	30	30	30
Tiempo [seg]	0 a 10	2 a 7	5 a 10	0 a 10

Paso temporal [seg]	0.03	0.03	0.03	0.03
Video estabilizado	SI	SI	SI	SI
α	1.00	1.00	1.00	1.00
IA [pixel]	30	30	20	p1:128x64 p2:64x32
SA [pixel]	20,20,25,15	5,2,2,2	5,5,5,10	-

4.2.8 Video 6 del Challenge FUDAA

El video 6 del Challenge Fudaa-LSPIV fue analizado, utilizando un caudal objetivo estimado aplicando Fudaa-LSPIV: 51.97 m³/s. Los datos adicionales para este procesamiento son las posiciones de los puntos de control y la batimetría.

Solo se realizaron procesamientos con Fudaa-LSPIV, para utilizar RIVeR no fue suficiente la información disponible sobre los puntos de control. Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.8 y la Tabla 4.8.

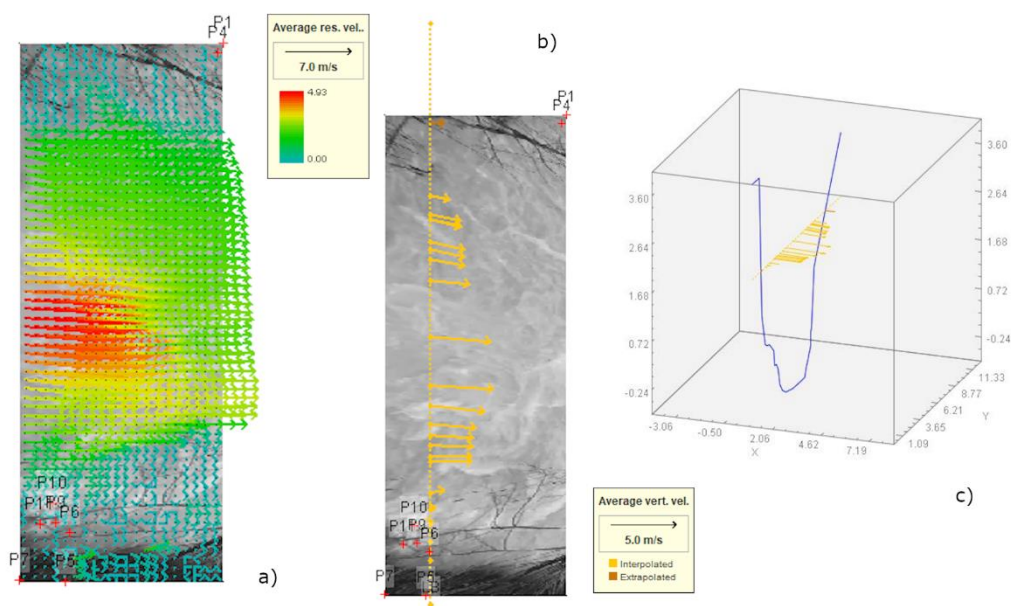


Figura 4.8. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV, c) Fudaa-LSPIV.

Tabla 4.8. Características del procesamiento. Video 6 del desafío FUDAA. Caudal objetivo: 51.97 m³/s.

<i>Ejercicio</i>	<i>8_F1</i>	<i>8_F2</i>	<i>8_F3</i>
<i>Software</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>
<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>57.14</i>	<i>39.27</i>	<i>44.67</i>
<i>FPS</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>30</i>
<i>Tiempo [seg]</i>	<i>0 a 10</i>	<i>4 a 9</i>	<i>3 a 8</i>
<i>Paso temporal [seg]</i>	<i>0.03</i>	<i>0.03</i>	<i>0.03</i>
<i>Video estabilizado</i>	<i>SI</i>	<i>SI</i>	<i>SI</i>
α	<i>0.85</i>	<i>0.90</i>	<i>0.85</i>
<i>IA [pixel]</i>	<i>30</i>	<i>20</i>	<i>30</i>
<i>SA [pixel]</i>	<i>20,20,15,30</i>	<i>5,5,5,10</i>	<i>5,5,5,10</i>

El procesamiento de este video resultó complejo debido a los problemas surgidos en la ortorectificación, ya que muchos de los puntos de control no se distinguían fácilmente.

4.2.9 Video 7 del Challenge FUDAA

El video 7 del Challenge Fudaa-LSPIV fue analizado, utilizando un caudal objetivo estimado aplicando Fudaa-LSPIV: 963.16 m³/s. Los datos adicionales para este procesamiento son las posiciones de los puntos de control y la batimetría.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.9 y la Tabla 4.9.

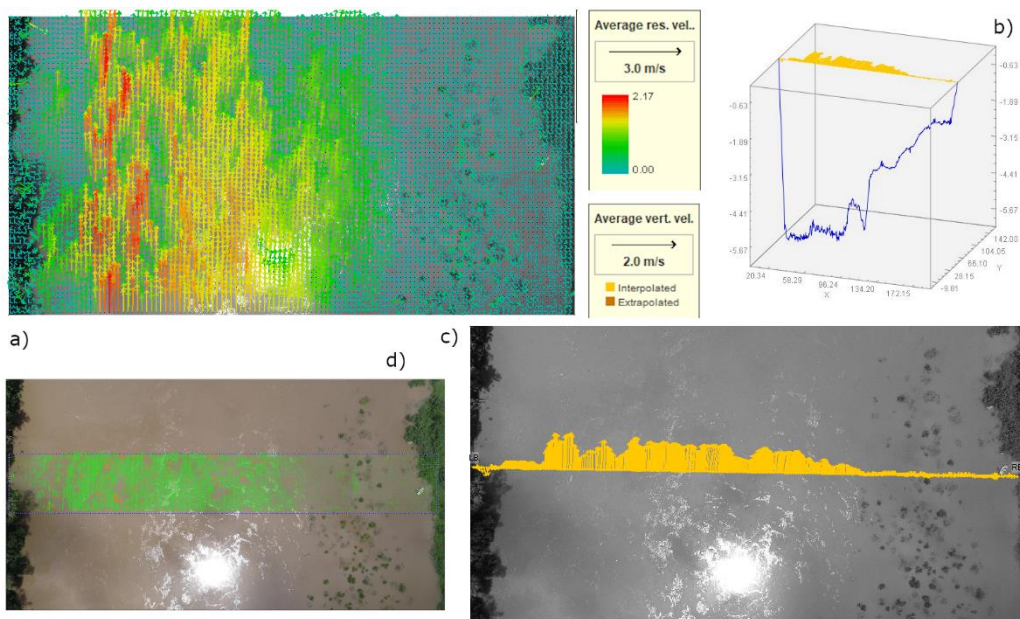


Figura 4.9. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV, c) PIVLab-RiVER y d) PIVLab-RiVER.

Tabla 4.9. Características del procesamiento. Video 7 del desafío FUDAA. Caudal objetivo: 963.16 m3/s.

Ejercicio	9_F1	9_F2	9_F3	9_F4	9_R
Software	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	RIVeR
Caudal [m3/s]	668.46	693.27	570.96	972.50	679.01
FPS	30	30	30	10	10
Tiempo [seg]	0 a 5	5 a 10	0 a 5	0 a 5	0 a 5
Paso temporal [seg]	0.03	0.03	0.03	0.10	0.10
Video estabilizado	SI	NO	NO	SI	NO
α	0.95	0.85	0.95	0.95	0.95
IA [pixel]	30	30	30	40	p1:60x30 p2:30x15
SA [pixel]	15,25,20,20	5,10,5,5	5,5,5,10	0,20,5,5	-

Los mejores resultados se obtuvieron con el ejercicio 9_F4, dado que se extrajo del procesamiento a un sector con vegetación en el curso de agua, además de plantear una tasa de extracción de imágenes más baja.

4.2.10 Video 8 del Challenge FUDAA

El video 8 del Challenge Fudaa-LSPIV fue analizado, utilizando un caudal objetivo estimado aplicando Fudaa-LSPIV: 0.64 m³/s. En la medición se utilizaron trazadores. Los datos adicionales para este procesamiento son las posiciones de los puntos de control y la batimetría. Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.10 y la Tabla 4.10.

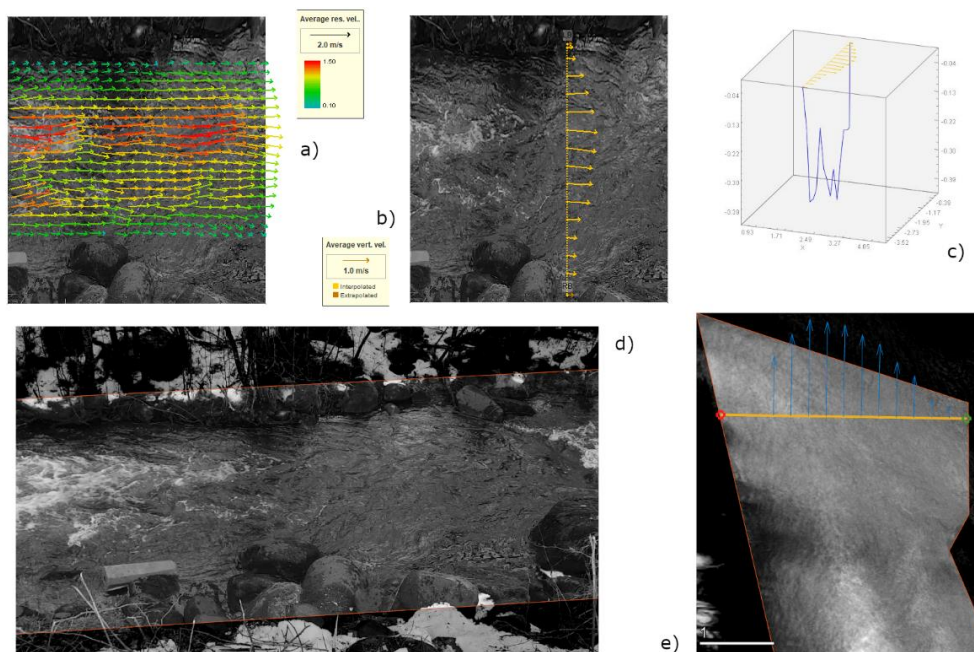


Figura 4.10. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV, c) Fudaa-LSPIV, d) PIVLab-RiVER y e) PIVLab-RiVER.

Tabla 4.10. Características del procesamiento. Video 8 del desafío FUDAA. Caudal objetivo: 0.64 m³/s.

Ejercicio	10_F1	10_F2	10_F3	10_R1	10_R2	10_R3
Software	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	RIVeR	RIVeR	RIVeR
Caudal [m ³ /s]	0.72	0.74	0.73	0.60	0.58	0.60
FPS	30	30	30	30	30	30
Tiempo [seg]	5 a 15	10 a 15	10 a 15	5 a 15	5 a 15	5 a 15
Paso temporal [seg]	0.03	0.03	0.03	0.033	0.033	0.033
Video estabilizado	NO	NO	NO	NO	NO	NO
α	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
IA [pixel]	50	50	26	p1:256x128 p2:128x64	p1:128x64 p2:64x32	p1:64x32 p2:32x16
SA [pixel]	15,30,20,20	15,30,20,20	9,9,9,20	-	-	-

4.2.11 Video Canal Villa Dolores

Este video corresponde a la determinación de caudal en el Canal Villa Dolores en Córdoba, Argentina. Este ejercicio es utilizado por la UNC para sus cursos de velocimetría por imágenes. Se utilizaron trazadores para la determinación del caudal y se contó con datos batimétricos y con la localización de los puntos de control. El caudal objetivo es de 3.84 m³/s y fue obtenido mediante procesamiento con RIVER.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.11 y la Tabla 4.11.

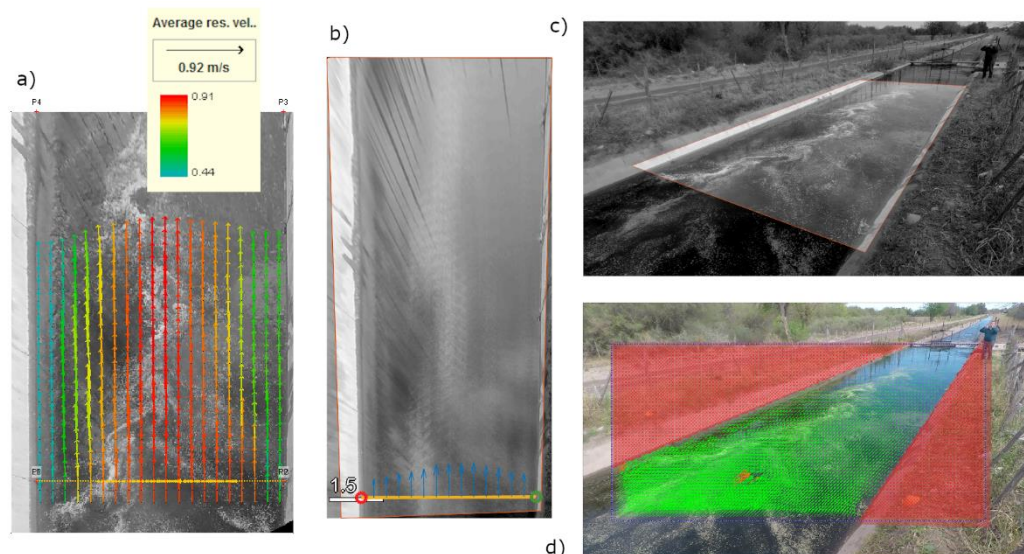


Figura 4.11. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) PIVLab-RiVER, c) PIVLab-RiVER y d) PIVLab-RiVER.

Tabla 4.11. Características del procesamiento. Video Canal Villa Dolores. Caudal objetivo: 3.84 m³/s.

Ejercicio	11_F1	11_F2	11_R1	11_R2
Software	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	RIVeR	RIVeR
Caudal [m ³ /s]	4.15	4.22	3.78	3.89
FPS	30	30	30	30
Tiempo [seg]	60 a 75	60 a 75	60 a 75	60 a 75
Paso temporal [seg]	0.03	0.03	0.03	0.03
Video estabilizado	NO	NO	NO	NO
α	1.00	1.00	1.00	1.00
IA [pixel]	20	30	p1:128x64 p2:64x32	p1:80x40 p2:40x20
SA [pixel]	5,12,5,5	0,30,20,20	-	-

4.2.12 Video Castor River

El video Castor River corresponde al dataset de la publicación de Perks, Dal Sasso y col. 2020. En este conjunto de datos se cuenta con el video y la serie de imágenes orto-rectificadas, El caudal objetivo es de 27.48 m³/s y fue obtenido mediante un aforo con ADV.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.12 y la Tabla 4.12.

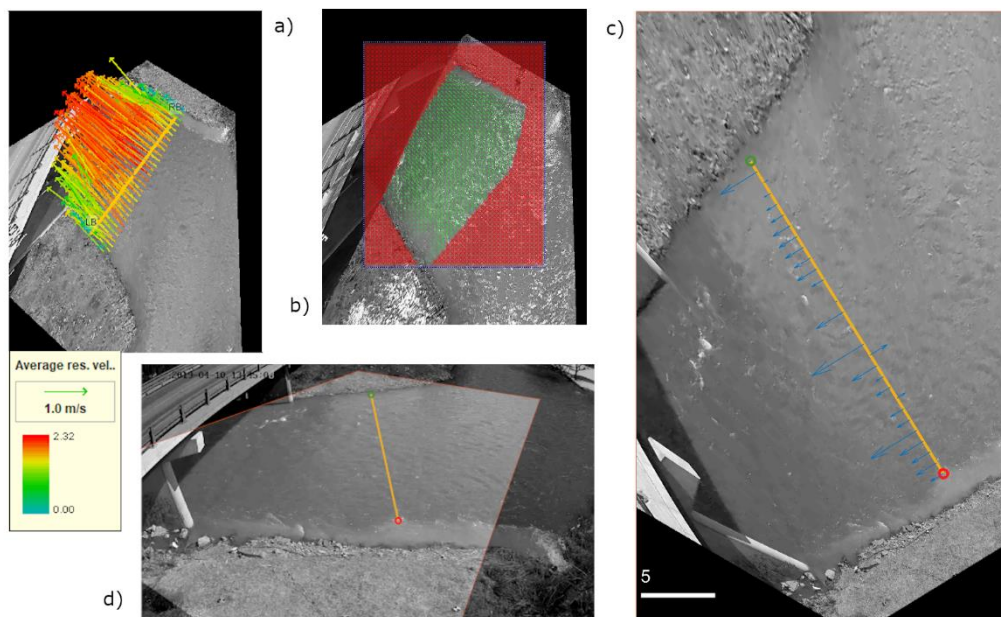


Figura 4.12. Velocidades superficiales: a) PIVLab-RiVER, b) PIVLab-RiVER, c) PIVLab-RiVER y d) Fudaa-LSPiV.

Tabla 4.12. Características del procesamiento. Video Castor River. Caudal objetivo: 27.48 m³/s.

<i>Ejercicio</i>	<i>12_F</i>	<i>12_R</i>
<i>Software</i>	<i>Fudaa-LSPiV</i>	<i>RiVeR</i>
<i>Caudal [m3/s]</i>	<i>31.73</i>	<i>24.71</i>
<i>FPS</i>	<i>20</i>	<i>20</i>
<i>Tiempo [seg]</i>	<i>25</i>	<i>25</i>
<i>Paso temporal [seg]</i>	<i>0.05</i>	<i>0.05</i>
<i>Video estabilizado</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>
α	<i>0.85</i>	<i>0.85</i>
<i>IA [pixel]</i>	<i>20</i>	<i>p1:64x32 p2:32x16</i>
<i>SA [pixel]</i>	<i>25,25,10,10</i>	<i>-</i>

4.2.13 Video La Morge River

El video de La Morge River se presenta en el dataset de Perks, Dal Sasso y col. 2020, pero cuyos resultados fueron originalmente presentados en (Hauet 2016). Este tramo de río presenta unas condiciones de flujo típicas, con una sección transversal de 7.2 m, una profundidad media de 0.41m y una velocidad media de 0.39 m/s. En este conjunto de datos se cuenta con el video y la serie de imágenes orto-rectificadas, El caudal objetivo es de 1.32 m³/s y fue obtenido mediante un aforo con ADV.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.13 y la Tabla 4.13.

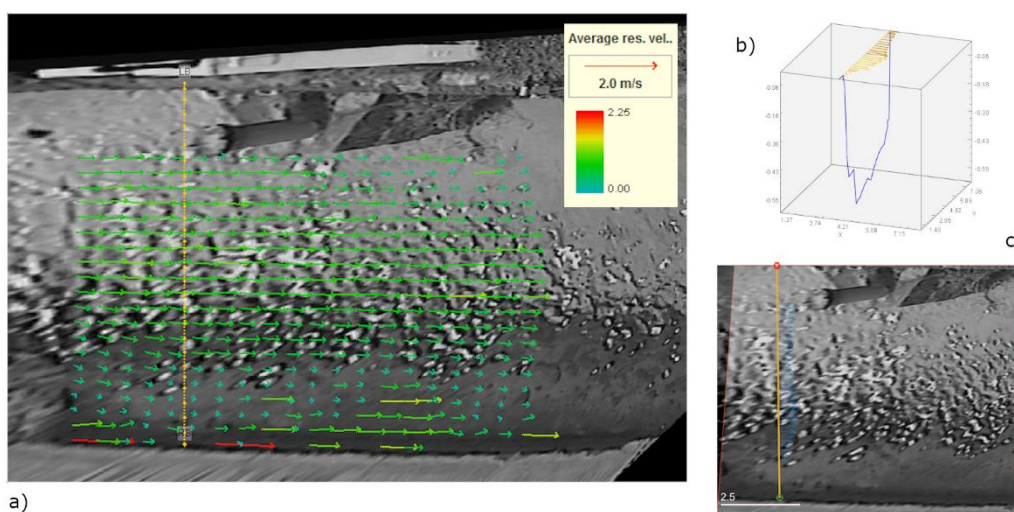


Figura 4.13. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV x, c) PIVLab-RiVER.

Tabla 4.13. Características del procesamiento. Video La Morge River (Perks et al., 2019). Caudal objetivo: 1.32 m³/s.

<i>Ejercicio</i>	<i>13_F1</i>	<i>13_F2</i>	<i>13_R</i>
<i>Software</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>RIVeR</i>
<i>Caudal [m3/s]</i>	<i>1.68</i>	<i>1.28</i>	<i>1.12</i>
<i>FPS</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>5</i>
<i>Tiempo [seg]</i>	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>10</i>
<i>Paso temporal [seg]</i>	<i>0.20</i>	<i>0.20</i>	<i>0.20</i>
<i>Video estabilizado</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>
α	<i>0.90</i>	<i>0.85</i>	<i>0.90</i>
<i>IA [pixel]</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>p1:128x64 p2:64x32</i>
<i>SA [pixel]</i>	<i>20,20,0,45</i>	<i>50,20,20,20</i>	-

4.2.14 Video Murg River

El video Murg River corresponde al dataset de la publicación de Perks, Dal Sasso y col. 2020. En este conjunto de datos se cuenta con el video y la serie de imágenes orto-rectificadas, El caudal objetivo es de 2.76 m³/s y fue obtenido mediante un aforo con ADV.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.14 y la Tabla 4.14.

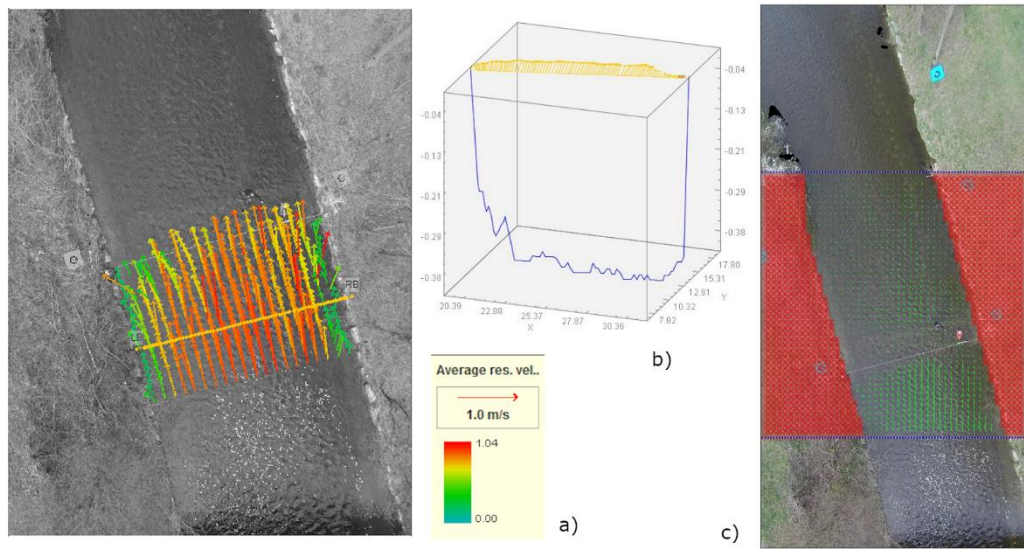


Figura 4.14. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV y c) PIVLab-RiVER.

Tabla 4.14. Características del procesamiento. Video Murg River (Perks et al., 2019). Caudal objetivo: 2.76 m³/s.

<i>Ejercicio</i>	<i>14_F1</i>	<i>14_F2</i>	<i>14_R</i>
<i>Software</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>RiVeR</i>
<i>Caudal [m3/s]</i>	<i>2.92</i>	<i>2.79</i>	<i>1.57</i>
<i>FPS</i>	<i>12</i>	<i>12</i>	<i>12</i>
<i>Tiempo [seg]</i>	<i>12.5</i>	<i>5</i>	<i>12.5</i>
<i>Paso temporal [seg]</i>	<i>0.08</i>	<i>0.08</i>	<i>0.08</i>
<i>Video estabilizado</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>
α	<i>0.85</i>	<i>1.00</i>	<i>0.85</i>
<i>IA [pixel]</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>p1:128x64 p2:64x32</i>
<i>SA [pixel]</i>	<i>0,30,25,25</i>	<i>27,27,5,5</i>	<i>-</i>

4.2.15 Video La Vence River

El video La Vence River corresponde al dataset de la publicación de Perks et al. (2020). En este conjunto de datos se cuenta con el video y la serie de imágenes orto-rectificadas.

El caudal objetivo es de 1.15 m³/s y fue obtenido mediante un aforo con ADV.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.15 y la Tabla 4.15.

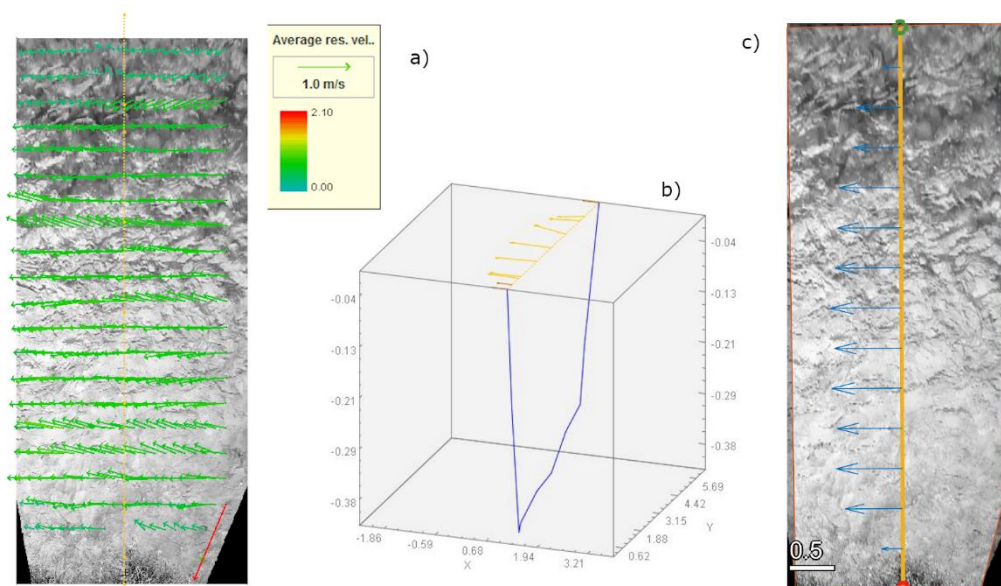


Figura 4.15. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV y c) PIVLab-RiVER.

Tabla 4.15. Características del procesamiento. Video La Vence River (Perks et al., 2019). Caudal objetivo: 1.15 m³/s.

Ejercicio	15_F1	15_F2	15_R
Software	Fudaa-LSPIV	Fudaa-LSPIV	RIVeR
Caudal [m ³ /s]	1.30	1.06	1.19
FPS	30	30	30
Tiempo [seg]	5	5	5
Paso temporal [seg]	0.03	0.03	0.03
Video estabilizado	NO	NO	NO
α	1.00	1.00	1.00
IA [pixel]	30	30	p1:128x64 p2:64x32
SA [pixel]	20,20,30,0	25,13,13,13	-

4.2.16 Video Salmon River

El video Salmon River corresponde al dataset de la publicación de Perks et al. (2020). En este conjunto de datos se cuenta con el video y la serie de imágenes orto-rectificadas. El caudal objetivo es de 22.87 m³/s y fue obtenido mediante un aforo con ADV.

Los resultados del procesamiento se presentan en la Figura 4.16 y la Tabla 4.16.

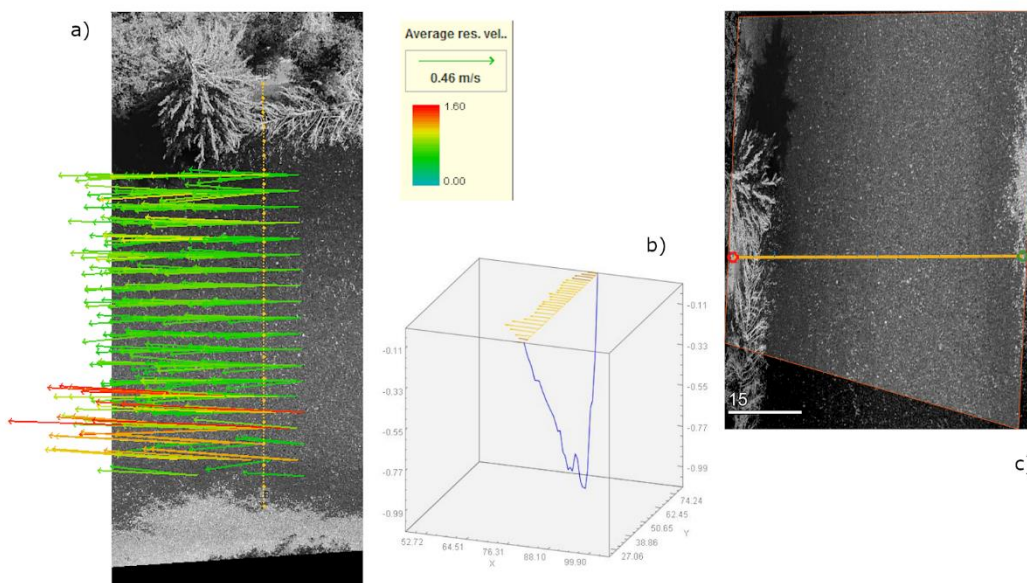


Figura 4.16. Velocidades superficiales: a) Fudaa-LSPIV, b) Fudaa-LSPIV y c) PIVLab-RiVER.

Tabla 4.16. Características del procesamiento. Video Salmon River. Caudal objetivo: 22.87 m³/s.

<i>Ejercicio</i>	<i>15_F</i>	<i>15_R</i>
<i>Software</i>	<i>Fudaa-LSPIV</i>	<i>RIVeR</i>
<i>Caudal [m3/s]</i>	<i>21.67</i>	<i>17.01</i>
<i>FPS</i>	<i>24</i>	<i>24</i>
<i>Tiempo [seg]</i>	<i>6.3</i>	<i>60</i>
<i>Paso temporal [seg]</i>	<i>0.04</i>	<i>0.04</i>
<i>Video estabilizado</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>
<i>α</i>	<i>0.85</i>	<i>0.85</i>
<i>IA [pixel]</i>	<i>100</i>	<i>p1:64x32 p2:32x16</i>
<i>SA [pixel]</i>	<i>100,75,75,0</i>	<i>-</i>

A continuación se describen los datos disponibles para el conjunto de las estaciones de monitoreo de ACUMAR. Finalmente, en virtud del análisis de los datos y de las condiciones hidrodinámicas, se presenta el listado de estaciones que cumplen con todos requisitos para poder elaborar una relación entre alturas y caudales y cuentan con una cantidad razonable de aforos (es decir las estaciones donde se aplicará el software *BaRatinAGE* a fin de establecer las curvas HQ).

4.3 Sensibilidad de parámetros

Se seleccionaron procesamientos representativos de diferentes condiciones del flujo. Actualmente, se cuenta con situaciones de caudales medios y altos, por lo que a futuro se deberían incorporar situaciones con caudales bajos. Para este análisis, se trabajó con el video 5 del Challenge Fudaa-LSPIV (18.67 m³/s) (como representativo de escenario de caudales medios) y el 3 del Challenge Fudaa-LSPIV (52.79 m³/s) (como escenario de caudales altos).

En el caso del uso del software Fudaa-LSPIV, se evaluó la sensibilidad de los parámetros: FPS (tasa de extracción de imágenes), IA (área de interrogación) y SA (área de búsqueda). En el caso de PIVLab-RIVeR, los parámetros resultaron: FPS y IA. Con ambos softwares se evaluaron además la performance de la aplicación de los filtros de velocidades.

4.3.1 Software Fudaa-LSPIV

4.3.1.1 Parámetros de búsqueda

Se seleccionó como escenario base el utilizado en el procesamiento de videos y se evaluó la sensibilidad de estos parámetros considerando un aumento y disminución de sus dimensiones en un 50 %. Las comparaciones se realizaron utilizando el software Fudaa-LSPIV (ver Tabla 4.17).

Tabla 4.17. Ensayos de sensibilidad a los parámetros de búsqueda.

Caudal	Escenario	IA [px]	SA [px]	Q [m ³ /s]	Diferencia [%]
Medio	Base	30	20,20,25,15	17.40	-
Medio	IA-SA (-50%)	16	10,10,12,8	17.76	2.10
Medio	IA-SA (+50%)	46	30,30,38,23	17.00	-2.30
Alto	Base	20	15,15,10,20	52.08	-
Alto	IA-SA (-50%)	10	8,8,5,10	55.08	5.80
Alto	IA-SA (+50%)	30	23,23,15,30	51.27	-1.60

En el caso de caudales medios la variación de caudal final obtenido varió de -2.30 a 2.07 %, en el caso de caudales altos esta variación fue de -1.60 a 5.80 %. La mayor diferencia se presenta en IA y SA demasiado chicos que pueden no estar contemplando las ventanas de interrogación en el siguiente instante de tiempo, es decir, patrones que por altas velocidades no llegan a ser observadas en la próxima ventana de interrogación produciendo correlaciones más bajas.

4.3.1.2 Filtros de postprocesamiento

En este caso se eligió como escenario base el utilizado en los procesamientos y se evaluó la sensibilidad ante el uso y no uso de filtros de velocidad. Los escenarios bases contemplan el uso de filtros con diferentes características según la condición hidrológica y de filmación. En el caso de no usar filtros se produjo una subestimación de los caudales de -5.90 a -6.50 %, esto se debe a que no se eliminan filtros espurios de bajas magnitudes que disminuyen la calidad de los resultados (ver Tabla 4.18).

Comentarios: (*) se aplicaron filtros de velocidad de -1.0 e30 m/s a 1.0 e30 m/s en magnitud, V_x de -1.0 e30 m/s a -0.15 m/s y V_y de -0.15 m/s a 0.15 m/s. (**) se aplicaron filtros de velocidad de 0.1 m/s a 4 m/s en magnitud, V_x de 0.1 m/s a 4 m/s y V_y de 0.1 a 4 m/s.

Tabla 4.18. Ensayos de sensibilidad a los filtros de postprocesamiento.

Caudal	Escenario	IA [px]	SA [px]	Q [m ³ /s]	Diferencia [%]
Medio	Base	30	20,20,25,15	17.40	-
Medio	Sin filtros	30	20,20,25,15	16.27	-6.50
Alto	Base	20	15,15,10,20	52.08	-
Alto	Sin filtros	20	15,15,10,20	49.03	-5.90

4.3.1.3 Tasa de extracción de imágenes (FPS)

En este caso se eligieron escenarios base procesamientos que presentan FPS de 30 y se los submuestreo a 15, el análisis de sobremuestreo no es posible. En este caso se obtuvo una subestimación de los caudales que van de -0.60 a -1.90 % (Ver Tabla 4.19).

Tabla 4.19. Ensayos de sensibilidad a la tasa de extracción de imágenes (FPS).

Caudal	Escenario	IA [px]	SA [px]	FPS	Q [m ³ /s]	Diferencia [%]
Medio	Base	30	20,20,25,15	30	17.40	-
Medio	Sin filtros	30	20,20,25,15	15	17.29	-0.60
Alto	Base	20	15,15,10,20	30	52.08	-
Alto	Sin filtros	20	15,15,10,20	15	51.09	-1.90

4.3.2 Software RIVeR

4.3.2.1 Parámetros de búsqueda

En este caso se evaluó la sensibilidad ante la modificación del tamaño de las áreas de búsqueda, duplicándolas y reduciéndolas a la mitad. Se obtuvo una subestimación mayor con respecto al caudal base ante el aumento de las áreas de búsqueda, hasta 16.40 % en condiciones medias y 28.70 % ante caudales altos (ver Tabla 4.20).

Tabla 4.20. Ensayos de sensibilidad a los parámetros de búsqueda.

Caudal	IA [px]	Q [m ³ /s]	Diferencia [%]
Medio	p1:128x64 - p2:64x32	15.08	-
Medio	p1:64x32 - p2:32x16	13.25	-12.10
Medio	p1:256x128 - p2:128x64	12.61	-16.40
Alto	p1:128 x 64 - p2:64x32	45.25	-
Alto	p1:64x32 - p2:32x16	42.61	-5.80
Alto	p1:256x128 - p2:128x64	32.26	-28.70

4.3.2.2 Filtros de postprocesamiento

En este caso se evaluó la sensibilidad ante el no uso de filtros obteniéndose una variación mayor en el escenario de caudales medios (28.18 %) con respecto al escenario de caudales altos (18.61 %). Ver Tabla 4.21.

Tabla 4.21. Ensayos de sensibilidad a los filtros de postprocesamiento.

Caudal	Escenario	Q [m ³ /s]	Diferencia [%]
Medio	Base	15.08	-
Medio	Sin filtros	10.83	-28.18
Alto	Base	45.25	-
Alto	Sin filtros	36.83	-18.61

4.3.2.3 Tasa de extracción de imágenes (FPS)

En este caso se evaluó la sensibilidad ante la modificación de la tasa de extracción de imágenes para caudales medios y altos. Se obtuvo una diferencia mayor en el caso del subsampleo para caudales altos (10.90 %) con respecto a caudales medios (7.80 %) (ver Tabla 4.22).

Tabla 4.22. Ensayos de sensibilidad a la tasa de extracción de imágenes (FPS).

<i>Caudal</i>	<i>FPS</i>	<i>Q [m³/s]</i>	<i>Diferencia [%]</i>
Medio	30	15.08	-
Medio	15	13.90	-7.80
Alto	20	45.25	-
Alto	10	40.34	-10.90

5 Conclusiones

En el presente informe desarrollado se avanzó en la descripción del estado del arte de las técnicas tradicionales y los nuevos desarrollos en el aforo de caudales líquidos hasta la actualidad. En particular se profundizó en el conocimiento de la técnica LSPIV, absorbiendo la experiencia adquirida a través de la puesta en práctica de mediciones hechas por otros grupos técnicos.

Durante el proceso de aprendizaje se utilizaron los softwares RIVeR y Fudaa-LSPIV, a continuación se explicitan las características salientes de cada uno de ellos.

Fudaa-LSPIV

Entre las principales ventajas de este software, se destacan:

- Permite hacer rectificación 3d con ingreso manual de los datos.
- Incluye una verificación de los GPR.
- A la hora de elegir el tamaño del área de búsqueda, informa el desplazamiento máximo equivalente en m/s en cada dirección que es capaz de abarcar. Esto permite definir el tamaño de la SA acorde a la velocidad del flujo.

A su vez, las desventajas que se observaron son las siguientes:

- Sin posibilidades de preprocesamiento.
- Menor cantidad de herramientas de post procesamiento.
- Requiere mucho espacio en disco (un archivo de salida requiere un mínimo de 600Mb)

RIVeR

El software RIVeR presenta las siguientes ventajas:

- Rectificación 2d con solo 4 puntos en el plano del agua y conociendo las distancias.
- Incluye herramientas de preprocesamiento y postprocesamiento.

Por el contrario, se observa como principal limitación:

- No permite ingresar coordenadas 3d de manera manual.

Los resultados obtenidos en los ensayos fueron sensibles a la parametrización de variables, principalmente en el caso de las definiciones de tamaños de áreas de interrogación, uso de filtros de velocidades y FPS de filmación. De estas variables, fueron los filtros los que presentaron mayor sensibilidad en los resultados.

Se concluyó que es necesario conocer el rango en el que se encuentra el caudal a estimar para terminar de ajustar los parámetros.

En general se observa una subestimación de los caudales obtenidos con LSPIV respecto de otras técnicas de medición.

Respecto a los softwares utilizados, se considera que ambos (RIVeR y FUDAA) son complementarios para la obtención de resultados de calidad.

Referencias

- Aguirre, H.D., Nanni, M.F., Bazzano, F.M., Espinosa Rojas, H.A., Lopez Kuchudis, B., 2019. Obtención de curva H-Q mediante aplicación de LSPIV sobre el río Los Sosa e el Departamento Monteros, Tucumán. VI Simposio sobre métodos experimentales en hidráulica. Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU).
- Bandini, F., Lüthi, B., Peña-Haro, S., Borst, C., Liu, J., Karagkiolidou, S., Hu, X., Lemaire, G.G., Bjerg, P.L., Bauer-Gottwein, P., 2021. A Drone-Borne Method to Jointly Estimate Discharge and Manning's Roughness of Natural Streams. *Water Resources Research*, 57 (2).
- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L., 2008. Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110 (3), 346-359.
- Bazzano, F.M., Espinosa Rojas, H.A., Nanni, M.F., Aguirre, H.D., Almaraz, P., Alba Fernandez, B., Lopez Kuchudis, B., Ruiz Nofal, E., Barber, H. Serrano, F., 2019. Vulnerabilidad de la población ante inundaciones urbanas en Tucumán mediante Velocimetría por Imágenes a Gran Escala (LSPIV). VI Simposio sobre métodos experimentales en hidráulica. Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU).
- Botelli, M., Guillén, N., García, C., Patalano, A., Chalabe, M., 2020. Aplicación de la técnica LSPIV en el diseño hidrológico de infraestructura hídrica. Cuadernos de Ingeniería. Nueva Serie. Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Salta, Argentina, 12, 21-38.
- Brevis, W., Niño, Y., Jirka, G., 2011. Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry. *Exp Fluids*, 50, 135-147.
- Dal Sasso, S.F., Pizarro, A., Samela, C., Mita, L., Manfreda, S., 2018. Exploring the optimal experimental setup for surface flow velocity measurements using PTV. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190.
- Dal Sasso, S.F., Pizarro, A., Manfreda, S., 2020. Metrics for the Quantification of Seeding Characteristics to Enhance Image Velocimetry Performance in Rivers. *Remote Sensing*, 12 (11).
- 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.
- Fujita, I., Komura, S., 1994. Application of Video Image Analysis for Measurements of River-Surface Flows. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 38, 733-738.
- Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., 1998. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36 (3), 397-414.
- Fujita, I., Watanabe, H., Tsubaki, R., 2007. Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV). *International Journal of River Basin Management*, 5 (2), 105-114.

Genç, O., Ardiçloğlu, M., Ağırallıoğlu, N., 2015. Calculation of mean velocity and discharge using water surface velocity in small streams. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 115-120.

Guillén, N.F., Patalano, A., García, C.M., Bertoni, J.C., 2017. Use of LSPIV in assessing urban flash flood vulnerability. *Nat Hazards*, 87, 383 – 394

Guillén, N.F., 2019. Optimización del diseño hidrológico e hidráulico utilizando LSPIV. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

Hauet, A., 2016. Monitoring river flood using fixed image-based stations: Experience feedback from 3 rivers in France. *The International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2016)*. DOI: 10.1201/9781315644479-87

Hauet, A., Morlot, T., Daubagnan, L., 2018. Velocity profile and depth--averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. *E3S Web Conf.*, 40.

Ioli, F., 2020. Evaluation of Airborne Image Velocimetry approaches using low-cost UAVs in riverine environments. Master's degree in environmental and land planning engineering. Tesis de maestría. School of Civil, Environmental y Land Management Engineering, Politecnico di Milano.

Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., Dramais, G., 2008. Application and evaluation of LSPIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19 (2), 117-127.

Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., Le Coz, J., 2016. Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges. *Hydrological Processes*, 30 (1), 90-105.

Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., Camenen, B., 2010. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, 394 (1). Flash Floods: Observations and Analysis of Hydrometeorological Controls, 42-52.

Le Coz, J., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, B., Le Boursicaud, R., 2014. Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free Fudaa-LSPIV software. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW, Lausanne, Switzerland, 1961-1967.*

Leitão, J.P., Peña-Haro, S., Lüthi, B., Scheidegger, A., Moy de Vitry, M., 2018. Urban overland runoff velocity measurement with consumer-grade surveillance cameras and surface structure image velocimetry. *Journal of Hydrology*, 565, 791-804.

Lewis, Q.W., Lindroth, E.M., Rhoads, B.L., 2018. Integrating unmanned aerial systems and LSPIV for rapid, cost-effective stream gauging. *Journal of Hydrology*, 560, 230-246.

Ljubičić, R., Strelnikova, D., Perks, M.T., Eltner, A., Peña-Haro, S., Pizarro, A., Dal Sasso, S.F., Scherling, U., Vuono, P., Manfreda, S., 2021. A comparison of tools and techniques for stabilising UAS imagery for surface flow observations. *Hydrology and Earth System Sciences*. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4557921>.

Lobo, A.P., 2019. Implementación de la técnica experimental de velocimetría por seguimiento de partículas (PTV) para cuantificar el recurso hídrico superficial en cursos fluviales de la provincia de Catamarca. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral.

Muste, M., Fujita, I., Hauet, A., 2008 Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 44 (4), <https://doi.org/10.1029/2008WR006950>.

Pal, S., Dominguez, F., Dillon, M.E., Alvarez, J., Garcia, C.M., Nesbitt, S.W., Gochis, D.W., 2021. Hydrometeorological Observations and Modeling of an Extreme Rainfall Event Using WRF and WRF-Hydro during the RELAMPAGO Field Campaign in Argentina. *Journal of Hydrometeorology*, 22 (2), 331 – 351.

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.

Pearce, S., Ljubičić, R., Peña-Haro, S., Perks, M., Tauro, F., Pizarro, A., Dal Sasso, S.F., Strelnikova, D., Grimaldi, S., Maddock, I., Paulus, G., Plavšić, J., Prodanović, D., Manfreda, S., 2020. An Evaluation of Image Velocimetry Techniques under Low Flow Conditions and High Seeding Densities Using Unmanned Aerial Systems. *Remote Sensing*, 12 (2).

Perks, M.T., Russell, A. J., Large, A.R.G., 2016 Technical Note: Advances in flash flood monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Hydrology and Earth System Sciences*, 20 (10), 4005-4015.

Perks, M.T., 2020. KLT-IV v1.0: image velocimetry software for use with xed and mobile platforms. *Geoscientific Model Development*, 13 (12), 6111-6130.

Perks, M.T., Dal Sasso, S.F., Hauet, A., Jamieson, E., Le Coz, J., Pearce, S., Peña-Haro, S., Pizarro, A., Strelnikova, D., Tauro, F., Bomhof, J., Grimaldi, S., Goulet, A., Hortobagyi, B., Jodeau, M., Käfer, S. and Ljubicic, R., Maddock, I., Mayr, P., Paulus, G., Pénard, L., Sinclair, L., Manfreda, S., 2020. Towards harmonisation of image velocimetry techniques for river surface velocity observations. *Earth System Science Data*, 12 (3), 1545-1559

Rosten, E., Drummond, T., 2005. Fusing points and lines for high performance tracking. *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05)*, 2, 1508-1515. doi: 10.1109/ICCV.2005.104.

Strelnikova, D., Paulus, G., Käfer, S., Anders, K., Mayr, P., Mader, H., Scherling, U., Schneeberger, R., 2020. Drone-Based Optical Measurements of Heterogeneous Surface Velocity Fields around Fish Passages at Hydropower Dams. *Remote Sensing*, 12 (3).

Stumpf, A., Augereau, E., Delacourt, C., Bonnier, J., 2016. Photogrammetric discharge monitoring of small tropical mountain rivers: A case study at Rivière des Pluies, Réunion Island. *Water Resources Research*, 52 (6), 4550-4570.

- Sutarto, T.E., 2015. Application of Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) to Identify Flow Pattern in a Channel. *Procedia Engineering*, 125, 213-219
- Sveen, J.K., Cowen, E.A., 2004. Quantitative imaging techniques and their application to wavy flows». *PIV and Water Waves*, 1-49.
- Tauro, F., Grimaldi, S., Petroselli, A., Rulli, M.C., Porri, M., 2012. Fluorescent particle tracers for surface flow measurements: A proof of concept in a natural stream. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9, 4465-4503. doi: 10.5194/hessd-9-4465-2012.
- Tauro, F., Porfiri, M., Grimaldi, S., 2014. Orienting the camera and firing lasers to enhance large scale particle image velocimetry for streamflow monitoring. *Water Resources Research*, 50 (9), 7470-7483.
- Tauro, F., 2016. Particle tracers and image analysis for surface flow observations. *WIREs Water*, 3 (1), 25-39. <https://doi.org/10.1002/wat2.1116>
- Tauro, F., Petroselli, A., Porfiri, M., Giandomenico, L., Bernardi, G., Mele, F., Spina, D., Grimaldi, S., 2016. A novel permanent gauge-cam station for surface-flow observations on the Tiber River. *Geoscientific Instrumentation, Methods, and Data Systems*, 5 (1), 241-251.
- Tauro, F., Piscopia, R., Grimaldi, S., 2017. Streamflow Observations from Cameras: Large-Scale Particle Image Velocimetry or Particle Tracking Velocimetry? *Water Resources Research*, 53 (12), 10374-10394.
- Tauro, F., Tosi, F., Mattoccia, S., Toth, E., Piscopia, R., Grimaldi, S., 2018. Optical Tracking Velocimetry (OTV): Leveraging Optical Flow and Trajectory-Based Filtering for Surface Streamflow Observations. *Remote Sensing*, 10 (12).
- Tauro, F., Piscopia, R., Grimaldi, S., 2019. PTV-Stream: A simplified particle tracking velocimetry framework for stream surface flow monitoring, 172, 378-386.
- 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 (1).
- Tsubaki, R., Fujita, I., Tsutsumi, S., 2011. Measurement of the flood discharge of a small-sized river using an existing digital video recording system. *Journal of Hydro-environment Research*, 5 (4), 313-321.
- Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J.B., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A., Salvaro, M., 2016. Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resources Research*, 52 (2), 1108-1126
- Yorke, T.H., Oberg, K.A., 2002. Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers, *Flow Measurement and Instrumentation*, 13 (5), 191 – 195.