

Aforos de ríos y arroyos en la Cuenca Matanza-Riachuelo

Informe 08 – Análisis preliminar de las incertidumbres de la metodología *Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)*



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

Proyecto INA 407
Informe LHA 07-407-22
Ezeiza, septiembre de 2023

Equipo de trabajo (por orden alfabético)

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

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

Subgerencia Centro de la Región Semiárida – Instituto Nacional del Agua

Msc. Ing. Ana I. Heredia Ligorria

Informe realizado por:

Pablo E. García

Nicolás Ortiz

Tabla de contenido

1. Introducción	4
1.1. Informe del análisis preliminar de incertidumbres de la metodología Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)	5
2. Análisis preliminar de performance de la metodología LSPIV	6
2.1. Fundamentos de la metodología LSPIV.....	6
2.1.1. Adquisición de imágenes.....	7
2.1.2. Trazadores.....	7
2.1.3. Preprocesamiento de imágenes.....	8
2.1.4. Procesamiento de imágenes	8
2.1.5. Postprocesamiento	10
2.1.6. Elección de Software	10
2.2. Implementación de la técnica LSPIV en la Cuenca Matanza Riachuelo	11
2.3. Metodologías de validación	13
2.4. Resultados	15
2.5. Comentarios preliminares.....	15

1. Introducción

El monitoreo de parámetros ambientales dentro de la Cuenca Matanza Riachuelo (CMR) es de suma importancia para la definición de acciones a realizar por la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) en búsqueda de cumplir los objetivos propuestos en el Plan Integral de Saneamiento Ambiental (PISA).

Los estudios de la calidad de agua superficial y subterránea, sedimentos y aire, se llevan a cabo en la red de estaciones de monitoreo puntual y continuo extendidas a lo largo de toda la CMR. Toda la información obtenida a partir de dichos estudios constituye un conjunto de herramientas de gestión fundamental para evaluar las acciones planificadas en materia de reducción de las fuentes de contaminación tienen sobre la calidad ambiental de la Cuenca.

Para monitorear la calidad del agua superficial, ACUMAR estableció una red que incluye puntos sobre el río principal Matanza Riachuelo, sus afluentes, distintos arroyos a lo largo de la extensión aguas arriba y hasta sus nacientes, involucrando a las 14 subcuencas que conforman la Cuenca Hídrica del Matanza Riachuelo.

El presente proyecto tiene por objetivo principal darle continuidad al monitoreo integrado y simultáneo de calidad de agua superficial y caudales que viene realizando la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) en forma sistemática desde el año 2007. Para eso se plantean 2 Campañas de aforos en diferentes estaciones de la red.

Los aforos previstos para cada una de las Campañas se efectuarán utilizando diferentes técnicas, entre las que se destacan aquellas que utilizan tecnología Doppler como es el caso de ADV (*Acoustic Doppler Velocity*) y ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) y una nueva tecnología de medición indirecta de velocidades superficiales del agua, a partir de la utilización de cámaras terrestres, aéreas e incluso radares, que permiten estimar caudales líquidos mediante el postprocesamiento de los videos registrados. Para esta última tecnología, denominada velocimetría por imágenes, se usará como algoritmo de análisis el denominado '*Large Scale Particle Image Velocimetry*' (LSPIV).

Adicionalmente a las campañas mencionadas previamente, durante el Proyecto se realizarán una serie de aforos especiales, que buscarán registrar las ondas de crecida en diferentes cursos de agua, con el objetivo principal de ampliar, mejorar y/u optimizar las curvas de relaciones altura-caudal (HQ) que posee la ACUMAR. Y se evaluará la performance de la técnica de aforo LSPIV.

1.1. Informe del análisis preliminar de incertidumbres de la metodología Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)

Históricamente, los aforos realizados en las campañas de monitoreo de ACUMAR se llevan a cabo utilizando técnicas de medición mecánicas (molinetes) y acústicas, como ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) y ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Desde el año 2020 se está utilizando una nueva tecnología de medición denominada velocimetría por imágenes que permite determinar indirectamente velocidades superficiales del curso de agua a partir de la utilización de cámaras terrestres, aéreas e incluso radares, a fin de estimar caudales líquidos mediante el postprocesamiento de los vídeos registrados. En particular, se trabajó con un algoritmo de procesamiento denominado LSPIV (*Large Scale Particle Image Velocimetry*).

Es importante mencionar que en gran parte de las secciones de aforo la calidad del agua es deficitaria, por lo que resulta imperante utilizar técnicas de aforo alternativas que eviten o minimicen el contacto directo con el agua. Por otro lado, la existencia de trazadores (residuos sólidos orgánicos e inorgánicos) resulta una característica relevante para la implementación de LSPIV por no necesitar de la incorporación de trazadores, aunque en muchos casos carecen de homogeneidad en peso y distribución.

En el presente trabajo se describe preliminarmente la performance de la técnica LSPIV en distintas secciones de la red de estaciones de monitoreo de ACUMAR.

2. Análisis preliminar de performance de la metodología LSPIV

2.1. Fundamentos de la metodología LSPIV

En los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías de medición de velocidad del agua, a partir de la utilización de cámaras terrestres, aéreas e incluso radares, que permiten estimar caudales líquidos mediante el postprocesamiento de los cuadros de videos registrados mediante filmación.

La técnica no intrusiva LSPIV surge ante la necesidad de medir caudales cuando las técnicas convencionales (molinete, ADCP, ADV) no pueden ser utilizadas o resultan riesgosas, como por ejemplo en condiciones de caudal no estacionario, inundaciones repentinas, caudales bajos, cursos pequeños de baja profundidad, flujos de alta velocidad y cursos contaminados. Además, con la técnica de medición LSPIV es factible desarrollar sistemas automáticos de medición que permiten realizar mediciones continuas ante escenarios hidrológicos dinámicos.

El abordaje que realiza la velocimetría por imágenes de partículas (LSPIV) es de tipo euleriano (compara desplazamientos de patrones superficiales o grupos de partículas) y permite caracterizar el campo de velocidades superficiales mediante un análisis en el que se cuantifica el desplazamiento de partículas sembradas (trazadores) o de patrones superficiales (Figura 2.1).

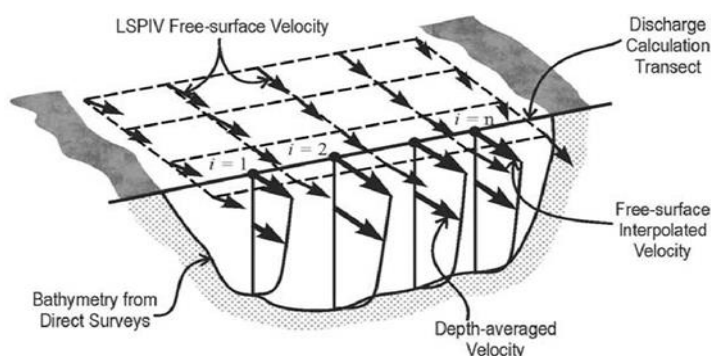


Figura 2.1. Esquema de velocidades superficiales observadas e interpolación en una sección transversal conocida (Muste et al., 2008)¹.

¹ Muste, M., I. Fujita & A. Hauet (2008). "Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments". Water Resources Research 44.4.

2.1.1. Adquisición de imágenes

La técnica LSPIV se implementa a partir de la obtención de una video filmación 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 del video con una discretización temporal constante permite realizar distintos tipos de análisis para obtener la velocidad superficial del flujo.

Entre las consideraciones para realizar una filmación adecuada se deben cumplir una serie de recomendaciones que incluyen: evitar lentes gran angulares, realizar grabaciones de un tiempo de al menos 1 minuto, filmar con una resolución mínima de 640 x 480 píxeles, utilizar plataformas de estabilización, evitar que el campo de visión contenga estructuras fijas como árboles, estructuras, entre otros, filmar en zonas donde los patrones de flujo sean uniformes y evitar reflejos, sombras y patrones brillantes en la superficie de filmación.

2.1.2. Trazadores

Para una correcta aplicación de la técnica es necesario contar con trazadores identificables en la superficie si no se trata de una crecida donde se observen cambios en los patrones de escurrimiento, de lo contrario el cálculo de velocidades no es preciso. Hay que elegir trazadores que presenten una densidad similar a la del líquido, que no se hundan y preferentemente de forma esférica. A su vez se busca que no afecten el flujo, presenten una densidad de sembrado que sea representativo y un color de contraste que sea fácilmente captado por imágenes digitales. Para cumplir con estos objetivos se eligió trabajar con viruta de madera, logrando un desempeño aceptable en su utilización (Figura 2.2).



Figura 2.2. Puntos fijos de referencia y sembrado de trazadores.

2.1.3. Preprocesamiento de imágenes

El ruido debido a las condiciones ambientales, como la iluminación o las sombras, pueden influir fuertemente en la cuantificación de la siembra efectiva. Sin embargo, en la fase de preprocesamiento la siembra original se puede maximizar utilizando técnicas para enfatizar el contraste entre los trazadores y el fondo.

Otra etapa importante es la estabilización de imágenes, dado que cualquier movimiento que pueda tener la cámara durante la grabación, provocará desplazamientos de píxeles no deseados que sesgarán los resultados. Es por eso que es fundamental estabilizar los videos en los cuales el desplazamiento de los píxeles debido al movimiento de la cámara sea comparable a los desplazamientos debidos al movimiento de los trazadores. Esta debe usarse cuando existe movimiento durante las filmaciones (por ejemplo en el uso de celulares o drones).

2.1.4. Procesamiento de imágenes

Para el cálculo de vectores de velocidad es posible seleccionar entre una serie de algoritmos de acuerdo al software que se utilice. Los procesamientos de imágenes fueron realizados con el algoritmo *Direct Cross Correlation* (DCC).

La correlación cruzada (DCC) es el método de análisis de imágenes proveniente de aplicaciones de la técnica PIV, la cual se aplica sobre dos imágenes utilizando un pulso a cada una. Este método determina el desplazamiento medio de grupos de partículas contenidas en pequeñas regiones conocidas como ventanas de interrogación (AI), las cuales se distribuyen como una malla uniforme sobre la imagen. El objetivo es obtener la correlación de cada una de las AI de una imagen con su par de la siguiente imagen para diferentes tiempos.

Cada uno de los máximos obtenidos en el plano de correlación cruzada corresponde a los solapamientos de mayor similitud de una imagen sobre la otra, donde el máximo absoluto representa el desplazamiento promedio de las partículas en esa ventana de interrogación. De esta forma, las coordenadas del mismo permiten determinar el desplazamiento en píxeles que tuvieron las partículas.

Una vez aplicado el proceso de correlación cruzada sobre todas las ventanas de interrogación se obtiene como resultado una matriz que indica el desplazamiento medio de las partículas para cada ventana de interrogación. Conociendo además el intervalo de tiempo entre la captura de ambas imágenes y el factor de escala utilizado, es posible determinar la velocidad local del fluido en cada ventana, conformando el campo de velocidades de un fluido.

Para la implementación de esta metodología, es necesario escalar las imágenes con técnicas de rectificación (escalado, 2D o 3D), contar con puntos fijos en el terreno (con coordenadas o distancias relativas entre ellos) y conocer la batimetría de la sección transversal donde se quiere aforar (Figura 2.2). Para la obtención de esta información se realizaron mediciones de distancia entre puntos (escalado y 2D) y se utilizó un equipo GNSS diferencial en el caso de ser necesarias rectificaciones 3D.

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).

En lo que respecta a coeficientes de alta sensibilidad se destaca la 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 2.3). 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)², además se ve afectado por los números de Froude y Reynolds y la micro y macro rugosidad de fondo.

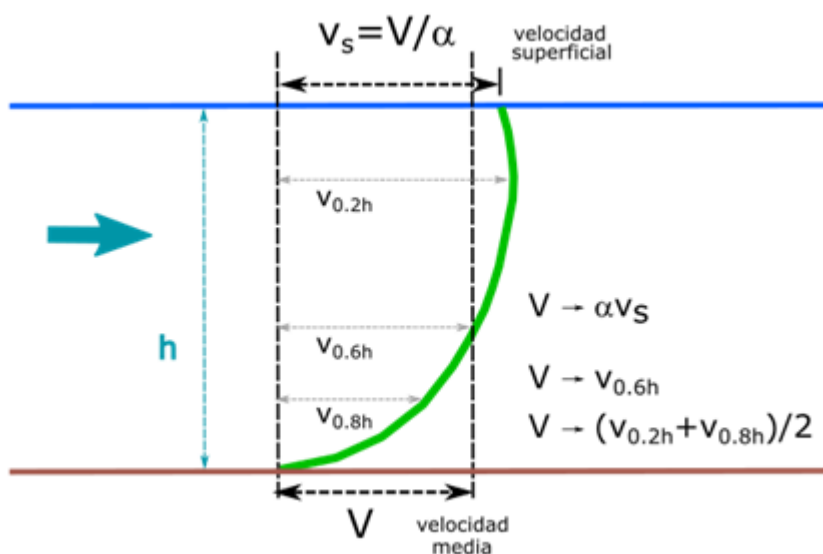


Figura 2.3. Perfil vertical de velocidad.

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)³ resume los diferentes coeficientes encontrados en la literatura.

En el estudio presentado en Hauet et al. (2018)⁴ se profundiza el estudio de este parámetro. El valor medio que hallaron es de 0,8. Establecieron una relación 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 con la rugosidad de fondo no se ve tan clara. Como

² Muste, M., I. Fujita & A. Hauet (2008). "Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments". Water Resources Research 44.4.

³ 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).

⁴ 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.

resultado de este trabajo se 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.

2.1.5. Postprocesamiento

Aún en condiciones ideales el 5 % de los vectores obtenidos luego de la evaluación de las imágenes son incorrectos. Con algoritmos especiales se debe realizar una validación automática para detectar y eliminar estos vectores a fin de reducir el error que los mismos producen. Existe una gran diversidad de herramientas para el filtrado de datos entre los que se incluyen el desvío estándar, límites de velocidades en x e y, coeficiente de correlación, entre otros.

En el proceso de cálculo del caudal es necesario determinar el coeficiente α que relaciona la velocidad superficial con la velocidad media del flujo. Este coeficiente depende de la geometría de la sección, rugosidad del fondo, geometrías aguas arriba y aguas abajo, flujo secundario, entre otros.

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 estimar el caudal total en la sección.

2.1.6. Elección de Software

Con anterioridad a las campañas de aforos y 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. Todo este proceso de aprendizaje se encuentra detallado en el Informe LH 01-397-21^{5,6} donde se proporciona una evaluación de sensibilidades de los parámetros y un diagnóstico de ventajas y desventajas de los softwares *FUDAA* y *RIVeR*.

Fudaa-LSPIV

Entre las fortalezas detectadas tenemos que permite hacer rectificación 3D con ingreso manual de los datos, incluye una verificación de los puntos de control (GPR). Al momento de elegir el tamaño del área de búsqueda, informa el desplazamiento máximo equivalente en m/s en cada

⁵ Nicolás Ortiz, Marina Lagos, Mayra Morale, Mariano Re y Pablo E. García. "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". Proyecto INA 397, Informe LHA 01-397-21. Comitente: ACUMAR, enero 2021.

⁶ www.bdh.acumar.gov.ar/bdh3/publicacion_master.php?idobject=508477&retorno=publicacion_listado.php

dirección que es capaz de abarcar, esto permite definir el tamaño del área de búsqueda (SA) acorde a la velocidad del flujo.

Entre las debilidades detectadas encontramos que no tiene posibilidades de preprocesamiento de imágenes y cuenta con menos cantidad de herramientas de post procesamiento con respecto a RIVeR

RIVeR

Entre las fortalezas detectadas tenemos que permite rectificación 2D con solo 4 puntos en el plano del agua conociendo las distancias e incluye herramientas exhaustivas de preprocesamiento y postprocesamiento. Entre las debilidades detectadas encontramos que no permite ingresar coordenadas 3D de manera manual.

2.2. Implementación de la técnica LSPIV en la Cuenca Matanza Riachuelo

Entre noviembre de 2020 y junio de 2023 se realizaron diversas campañas en la cuenca Matanza Riachuelo, en las cuales se aforaron un total de 43 secciones con LSPIV. A fin de contrastar los resultados obtenidos con esta técnica, cuando fue posible, se realizaron en simultáneo aforos con otros instrumentos (ADV o ADCP).

Las particularidades morfológicas, estructurales, de biodiversidad, tipo y grado de contaminación de cada sección, condicionaron la aplicación de la técnica para llevarla a cabo con mayor o menor dificultad, celeridad y riesgo.

Estas variables y su análisis previo al momento de medición resultaron fundamentales para la definición del lugar de ubicación de equipos de filmación, del lugar desde el cual realizar el sembrado, de la ubicación de puntos fijos, minimizando riesgos y aumentando la celeridad con el objetivo de asegurar la calidad de los videos de la medición.

El material seleccionado para ser utilizado como trazador fue viruta de madera (ver Figura 2.2), y existieron dificultades para conseguir un sembrado homogéneo debido a presencia de residuos sólidos flotantes, algas y vegetación (Figura 2.4).

En aquellas secciones donde no existían puentes aguas arriba de la sección de aforo fue necesario realizar el sembrado desde las márgenes o ingresando al curso. En secciones con velocidad de flujo o ancho considerable, la cantidad de personas dispuestas al sembrado fue crítica para mejorar la homogeneidad. Por otro lado la presencia de algas, residuos sólidos flotantes, o contaminantes como grasas en superficie (Figura 2.5) condicionan el arrastre de las partículas definidas como trazadores o impiden su distribución.

Para la realización de las filmaciones se utilizaron dos fuentes: una cámara fija *NIKON D5300* y dos Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT): *DJI Phantom 4 PRO* y *DJI Maveric 2 Enterprise Advanced*.

En relación a los instrumentos de filmación en todos los casos la primera opción a utilizar fueron los VANT's. Estos equipos tienen limitaciones asociadas, los vuelos deben hacerse siempre por encima del curso y a una distancia considerablemente segura de los obstáculos, en ocasiones

algunos árboles ubicados en las márgenes provocaba que las copas de los árboles quedaran ubicadas entre la cámara del equipo y el flujo lo que no permitía obtener imágenes limpias de la sección estudiada. Por otro lado, no es posible utilizarlo en zonas de altas interferencias magnéticas o zonas cercanas a aeropuerto y/o helipuertos.

La cámara *Nikon D5300* fue utilizada siempre ubicándola en puentes o márgenes de los cursos, en zonas seguras. La definición de la ubicación requirió de asegurar un ángulo que permita tomar una imagen que incluya la sección estudiada y los puntos de apoyo necesarios para la rectificación de la imagen. Otra situación tenida en cuenta fue la vibración producida por el tránsito vehicular en los puentes.



Figura 2.4. Sembrado no homogéneo.



Figura 2.5. Contaminantes en superficie

Con respecto a los puntos de referencia que permiten rectificar cada imagen se utilizaron conos de color contrastante. La ubicación de los mismos se encuentra condicionada por el acceso para su colocación, la visibilidad y la facilidad para medir sus coordenadas. Esta actividad estuvo vinculada a la condición de márgenes más o menos transitables (por vegetación, residuos, inclinación, superficies firmes o lodosas)

A fin de correlacionar el método de filmación en relación a las posibilidades de ubicación que permitía cada sección, en muchos casos se tomaron múltiples videos (con ambos equipos), en algunos casos redundantes y se llevó adelante el procesamiento de todos para asegurar resultados y verificar el método más óptimo de medición para cada condición.

Para el procesamiento de los datos se utilizaron, tal como se mencionó anteriormente, los software *FUDAA* (Figura 2.6) y *RIVER* dado que son softwares libres, ofrecen prestaciones similares y son ampliamente utilizados en la temática.

La elección del software para la implementación de la técnica en cada sección de aforo se basó en las características de la sección y el material filmográfico obtenido en relación a las fortalezas y debilidades de cada software descritas anteriormente.

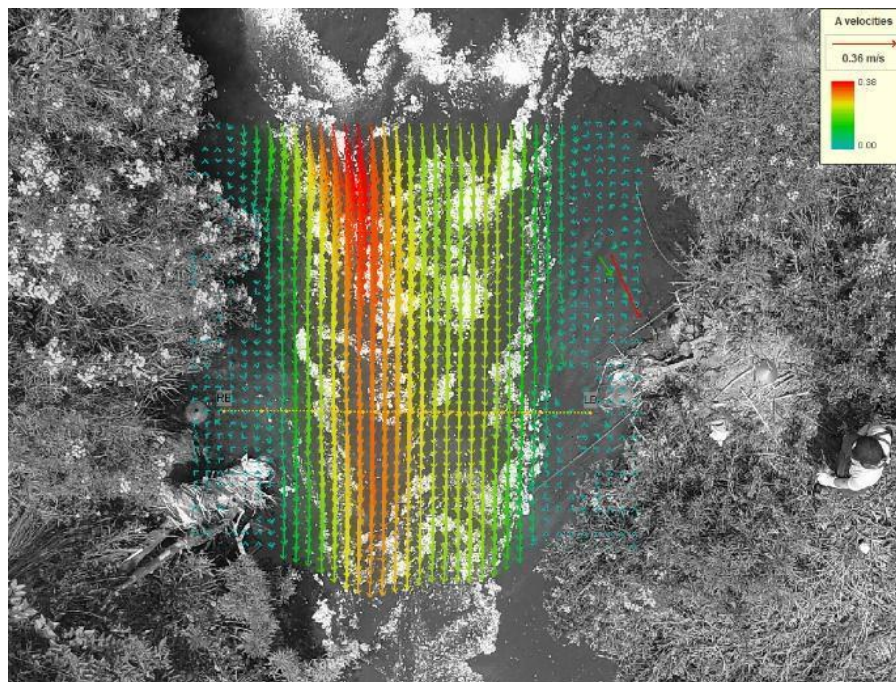


Figura 2.6. Campo de velocidades superficiales obtenido con Fudaa.

2.3. Metodologías de validación

A fin de contrastar los resultados obtenidos con la técnica LSPIV, se realizaron en paralelo aforos con otros instrumentos (ADV o ADCP) para tener valores de referencia. A continuación se describen los principales características de las mismas.

Perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP)

En los aforos se utilizó un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) *RiverSurveyor M9* y un perfilador *RS5*, ambos fabricados por *SonTek*. El ADCP provee información batimétrica (profundidad) de la sección y de las velocidades del flujo en tres direcciones ortogonales. Este instrumento mide la velocidad del agua utilizando el principio físico llamado cambio de frecuencia Doppler. Un transductor genera un pulso de sonido a una frecuencia conocida que se propaga a través del agua. Este se refleja en todas las direcciones por las partículas que se encuentran en suspensión (sedimento, materia orgánica, etc.). Una porción de la energía reflejada vuelve hacia el transductor donde es recibida por éste y el ADCP mide el cambio de frecuencia de la señal de retorno. Este cambio de frecuencia, medido por cada transductor, se traduce en la velocidad del agua en la dirección radial del mismo.

La configuración de sus sensores, denominada “Janus”, permite medir la velocidad en tres direcciones (el sistema de cuatro rayos provee información redundante en una dirección, generalmente la vertical, que permite determinar la calidad de la medición). Un conjunto de sensores del ADCP *RiverSurveyor M9* opera con una señal acústica de 3,0 MHz mientras que el otro conjunto de cuatro sensores lo hace con 1,0 MHz. Además, este equipo posee un rayo acústico vertical que envía señales a una frecuencia menor (0,5 MHz) lo que le permite tener un mayor alcance en profundidad. Su función es medir las profundidades y obtener la batimetría y topografía del fondo de la sección. Este instrumento puede ser comandado desde una computadora personal o bien con un teléfono celular, ambos dispositivos capaces de registrar los datos medidos. Para realizar la medición y visualizar los resultados obtenidos con el ADCP se utiliza el programa computacional llamado *RiverSurveyor Live*. Este programa permite configurar el instrumento y registra toda la información enviada por el equipo, generando resultados en forma de tablas, gráficos e imágenes, permitiendo además exportar los resultados a otros programas para un análisis más detallado.

Velocímetro acústico Doppler (ADV)

El velocímetro acústico Doppler, ADV por sus siglas en inglés, mide localmente velocidades tridimensionales del flujo, utilizando el principio de corrimiento de fase Doppler. El emisor de sonido genera una señal acústica en una frecuencia conocida que se propaga a través del agua a lo largo de su eje, y es reflejada por partículas presentes en el agua (sedimento, organismos pequeños, burbujas), que se asume se desplazan a la velocidad del agua y deben tener inercia muy pequeña. Una cierta porción de la energía reflejada vuelve a lo largo de los ejes de los receptores, la señal es registrada y procesada por los distintos componentes del ADV para determinar el cambio de frecuencia debido al efecto Doppler. El ADV mide localmente las velocidades del flujo en un pequeño volumen de medición localizado entre 5 y 10 cm del instrumento, dependiendo del modelo de ADV. El rango de velocidad que el instrumento es capaz de monitorear es programable por el usuario, y los valores máximos de ese rango pueden alcanzar el valor de ± 400 cm/s. En este proyecto se utilizó el ADV *FlowTracker2 Sontek*.

2.4. Resultados

En la Figura 2.7 se presentan los caudales líquidos medidos con la técnica LSPIV y los aforados con instrumentos acústicos. Comparando los resultados se puede ver que en cursos limpios (es decir sin vegetación ni residuos sólidos flotantes) las diferencias entre ambas técnicas son del orden del 10%. Cuando se aforó en cursos que presentaban residuos flotantes (RSF) las diferencias resultaron menores al 15%. En el caso de cursos con presencia de algas o vegetación las diferencias aumentaron, próximas al 35%.

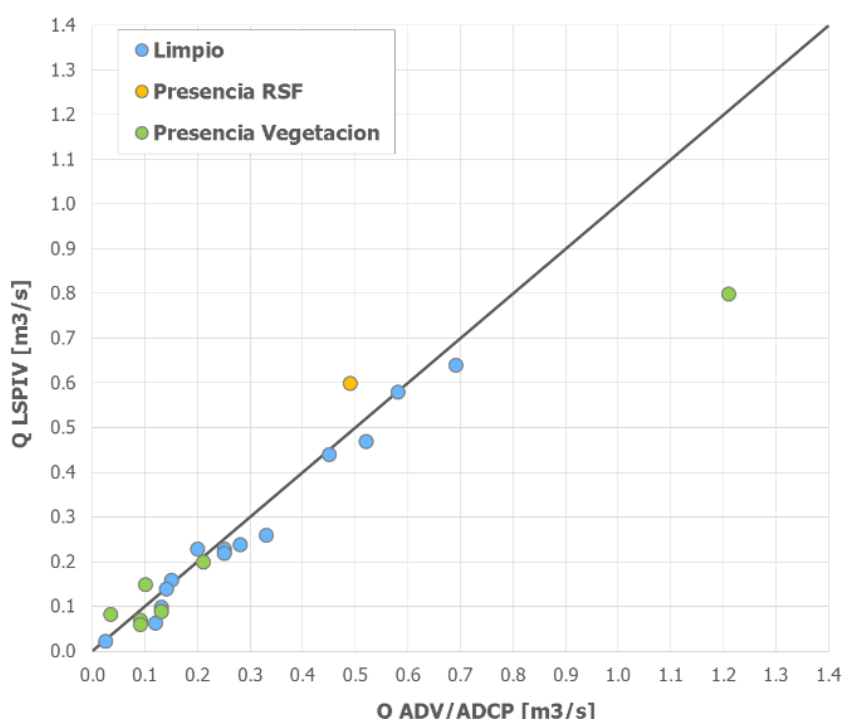


Figura 2.7. Comparación entre los resultados obtenidos con LSPIV y ADV o ADCP para diferentes estados de los cuerpos de agua aforados.

2.5. Comentarios preliminares

Se destaca la implementación de la técnica de aforo por velocimetría de imágenes (LSPIV) por primera vez en nuestra región en los monitoreos sistemáticos llevados a cabo por una autoridad de cuenca. En muchas secciones donde se pudo aforar utilizando LSPIV, la técnica resultó prometedora, mostrando algunas ventajas con otras técnicas entre las cuales se destacan: i) menores tiempos de aforo, ii) minimiza y/o evita el contacto con aguas contaminadas por parte del personal involucrado en las mediciones y iii) no requiere instrumental de alta complejidad. Si bien en algunas secciones las condiciones de implementación no fueron las ideales, se logró identificarlas las principales restricciones para el aforo mediante LSPIV, entre la que destaca la presencia de algas, islas de vegetación, y residuos sólidos flotantes en los cursos de agua que dificultaron el sembrado de trazadores y/o retuvieron a los mismos. Por otro lado, cabe destacar la imposibilidad de asociar una incertidumbre a priori de los resultados obtenidos de cada

procesamiento realizado con esta técnica. Considerando las limitaciones propias de la técnica, y las propias de cada sección de medición, la técnica LSPIV se presenta como una buena alternativa para aforar cuencas altamente contaminadas, sin poner en riesgo al personal y los instrumentos de medición.