

# Implementación de la Velocimetría por Análisis de Partículas (PIV) en la Red Hidrométrica del MARN en El Salvador

Alvarenga, F.

*Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, San Salvador, El Salvador.*

[malvarenga@ambiente.gob.sv](mailto:malvarenga@ambiente.gob.sv)

**Resumen** – Este estudio evalúa la aplicación de la técnica Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) como herramienta no intrusiva para la estimación de velocidades superficiales y caudales en canales abiertos, considerando su potencial para complementar los métodos hidrométricos convencionales utilizados por la red hidrométrica nacional de El Salvador. A partir de secuencias de video estabilizadas y ortorrectificadas, se procesaron campos de velocidad superficial que posteriormente fueron integrados con información topográfica para el cálculo de caudal, demostrando que la técnica ofrece resultados consistentes aun en condiciones operativas donde los aforos tradicionales presentan limitaciones. Los hallazgos confirman la viabilidad de LSPIV como alternativa de bajo costo, operativamente flexible y técnicamente robusta para fortalecer el monitoreo hidrológico y mejorar la construcción de curvas de gasto en estaciones con restricciones de accesibilidad, seguridad o variabilidad hidráulica.

**Palabras clave:** LSPIV, caudal, hidrometría, velocidad superficial, monitoreo hidrológico

**Abstract** – This study evaluates the application of the Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) technique as a non-intrusive tool for the estimation of surface speeds and flow rates in open channels, considering its potential to complement the conventional hydrometric methods used by El Salvador's national hydrometric network. From stabilized and orthorectified video sequences, surface velocity fields were processed which were later integrated with topographic information for flow calculation, demonstrating that the technique offers consistent results even in operating conditions where traditional measurements present limitations. The findings confirm the feasibility of LSPIV as a low-cost, operationally flexible and technically robust alternative to strengthen hydrological monitoring and improve the construction of expense curves in stations with accessibility, safety or hydraulic variability constraints.

## I. INTRODUCCIÓN

La medición precisa del caudal en cuerpos de agua es fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos y para la reducción de riesgos asociados a fenómenos hidrológicos extremos. Tradicionalmente, el MARN ha empleado métodos convencionales para este propósito; sin embargo, la incorporación de tecnologías avanzadas, como la Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (Large Scale Particle Image Velocimetry, LSPIV), ofrece la oportunidad de mejorar la precisión y eficiencia del monitoreo hidrológico, especialmente en corrientes donde las condiciones de flujo hacen que los métodos tradicionales resulten técnicamente inviables. Según la Organización Meteorológica Mundial (2008), “recientemente, se han utilizado enfoques basados en video para medir el caudal mediante la estimación de velocidades superficiales utilizando

métodos de Velocimetría por Imágenes de Partículas. Los datos de video pueden ser registrados en el sitio o, si se requiere información en tiempo real, transmitidos a través de alguna instalación de comunicación”. En este contexto, la implementación de tecnologías como LSPIV representa un avance significativo para la red hidrométrica del MARN, ya que permite no solo la obtención de datos más precisos, sino también aprovechar soluciones tecnológicas de bajo costo económico, siguiendo la tendencia mundial de innovación en monitoreo hidrológico.

## II. MARCO CONCEPTUAL

- a. Hidrometría y métodos tradicionales de aforo
  - 1) Red Hidrométrica del MARN

La red hidrométrica operada en El Salvador constituye la base instrumental para el monitoreo

continuo de los procesos hidrológicos a escala nacional y está integrada por aproximadamente 40 estaciones que transmiten en tiempo real, vía satélite, los niveles hidrométricos de los principales ríos del país (Figura 1).



Figura 1. Red hidrométrica gestionada por MARN/DOA.

Estos sitios de observación emplean predominantemente sensores sumergidos tipo burbujeador, sensores sin contacto basados en tecnología radar y dispositivos limnigráficos convencionales, lo que permite mantener series temporales confiables de nivel del agua, incluso bajo condiciones ambientales adversas (Figura 2).



Figura 2. Infraestructura de estaciones orientadas a la medición de niveles de ríos.

Este conjunto de instrumentos responde a estándares internacionales de observación hidrológica establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2010) y organismos técnicos estadounidenses como el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2017), los cuales recomiendan la integración de tecnologías robustas y redundantes para mejorar la continuidad operativa y reducir las incertidumbres asociadas a fluctuaciones rápidas del caudal.

Sin embargo, la estimación de velocidades y caudales a partir de estas series de nivel depende de curvas de gasto cuya construcción exige aforos

representativos en distintos regímenes hidráulicos. En el caso de El Salvador, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) es la entidad responsable de ejecutar estas mediciones, predominando el uso de la técnica de aforo por vadeo en la mayoría de estaciones hidrométricas. Este método requiere condiciones hidráulicas y de seguridad adecuadas para que el técnico hidromensur pueda medir las velocidades puntuales en verticales sucesivas a lo largo de la sección transversal. Su aplicación depende de manera crítica de que la profundidad y la velocidad del flujo permitan el ingreso al cauce y la operación del instrumental, lo que limita la obtención de datos durante eventos de caudal elevado o en ríos con morfologías complejas (Figura 3).



Figura 3. Medición por vadeo en una sección transversal de río de la red hidrométrica de MARN/DOA.

## 2) Consideraciones técnicas.

La implementación de la técnica de LSPIV en ambientes fluviales requiere una evaluación cuidadosa de condicionantes técnicos que determinan la fiabilidad de las mediciones de velocidad superficial. En primer lugar, las condiciones ambientales del sitio influyen directamente en la detectabilidad y seguimiento de las partículas trazadoras. Factores como la turbidez del agua, el contenido de sedimentos en suspensión, el reflejo especular sobre la lámina libre y la disponibilidad de iluminación natural o artificial afectan el contraste visual necesario para una correlación óptica robusta, como lo señalan diversas aplicaciones de LSPIV en ríos con dinámicas complejas (Jodeau et al., 2008; Tauro et al., 2016). En el contexto salvadoreño, donde las condiciones hidrometeorológicas pueden generar incrementos súbitos en turbidez durante eventos de crecida, la selección de ventanas temporales y posiciones de cámara adecuadas se vuelve fundamental para mantener la consistencia del registro videográfico.

Asimismo, el desempeño de LSPIV depende de la correcta selección del equipamiento óptico e instrumental, lo que incluye cámaras con resolución

suficiente, alta velocidad de captura y estabilidad geométrica, así como condiciones de iluminación que permitan discriminar entre partículas y superficie del agua. La elección de trazadores debe considerar su visibilidad, flotabilidad y capacidad para seguir fielmente la cinemática superficial del flujo, conforme a las recomendaciones para mediciones hidrométricas no intrusivas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2010). La implementación en El Salvador, donde la accesibilidad y seguridad de campo pueden limitar el uso de equipos intrusivos, presenta un escenario favorable para tecnologías ópticas remotas, siempre que se garantice la adecuada calibración fotogramétrica y el control de la estabilidad de las plataformas de observación.

El procesamiento de datos constituye otro componente crítico en la aplicación de LSPIV, ya que la calidad de los campos de velocidad superficial depende de algoritmos de correlación espacial capaces de identificar desplazamientos mínimos entre pares de imágenes sucesivas. El desarrollo o adaptación de software especializado debe incluir rutinas de corrección geométrica, filtros para eliminación de ruido, control de calidad automatizado y capacidades para generar productos hidrodinámicos. Por otra parte, la evaluación de opciones gratuitas de software de procesamiento es clave para la sostenibilidad de este tipo de sistemas, debido a las restricciones presupuestarias que se tienen para el funcionamiento de la red hidrométrica en MARN. Todas estas exigencias metodológicas concuerdan con las directrices emitidas por organismos como el USGS para la utilización de técnicas ópticas de aforo en condiciones de campo, particularmente en escenarios donde la medición directa mediante métodos tradicionales es riesgosa o impracticable (USGS, 2017). En este sentido, la integración de LSPIV en la hidrometría salvadoreña ofrece ventajas claras para robustecer la construcción de curvas de gasto, mejorar la estimación de velocidades superficiales durante crecidas y complementar la instrumentación existente en estaciones con limitaciones de acceso o interferencias hidráulicas.

#### b. Fundamentos de la técnica LSPIV

El principio de cálculo empleado en PIV se fundamenta en la estimación del desplazamiento superficial de trazadores visibles mediante técnicas estadísticas de correlación cruzada aplicadas a secuencias de imágenes ortorrectificadas. Jodeau, Hauet, Le Coz y Bodart (2019) describen que el método parte del supuesto de que los trazadores (objetos flotantes, burbujas o patrones coherentes de turbulencia) son arrastrados por el flujo y

conservan una apariencia reconocible entre dos imágenes sucesivas, permitiendo así su identificación por similitud espacial. Una vez corregidas las distorsiones geométricas mediante la ortorrectificación, el área de análisis se discretiza en una malla dividida en Áreas de Interrogación (IA) sobre las cuales se calcula la correlación entre dos imágenes consecutivas, buscando dentro de un Área de Búsqueda (SA) el patrón de píxeles que maximiza el coeficiente de correlación. Este cálculo de correlación se realiza de manera eficiente mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que permite evaluar la correlación cruzada en el dominio espectral y acelerar significativamente la identificación del desplazamiento óptimo entre ventanas de análisis (Figura 4). El vector que une la posición del patrón inicial con la ubicación donde la correlación alcanza su valor máximo, representa el desplazamiento del trazador en el intervalo temporal conocido (el tiempo existente entre un cuadro de imagen y otro), y su magnitud dividida entre dicho intervalo proporciona la velocidad superficial instantánea.

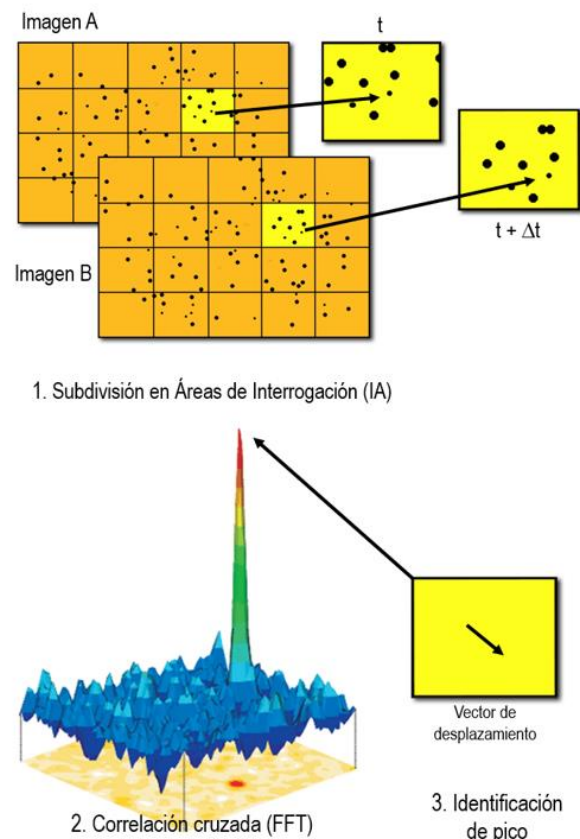


Figura 4. Principio de cálculo de correlación cruzada aplicado para el análisis PIV (Modificado de: Wieneke, 2017).

Este procedimiento se repite para todas las parejas de imágenes, generando campos de velocidad "casi instantáneos" que pueden filtrarse, promediarse y posteriormente emplearse en estimaciones

hidrodinámicas más complejas, como el cálculo de caudal mediante la incorporación de información batimétrica y modelos de distribución vertical de velocidades. El fundamento matemático de esta técnica de correlación estadística aplicada a áreas discretizadas permite capturar variaciones espaciales y temporales del flujo con alta resolución, manteniendo al mismo tiempo un carácter totalmente no intrusivo, aspecto clave para aforos en condiciones hidrológicas complejas.

c. Justificación de la aplicación de LSPIV en el contexto local

En contextos donde existen limitaciones instrumentales, de accesibilidad o de seguridad, la obtención sistemática de mediciones de velocidad in situ puede verse comprometida, afectando la calidad de los modelos hidrodinámicos y la precisión de los análisis de crecienta. En este marco, la técnica de Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) se perfila como una herramienta complementaria de alto potencial para la hidrometría nacional. Estudios pioneros han demostrado que LSPIV permite estimar campos de velocidad superficial mediante el análisis óptico de desplazamientos de trazadores naturales o artificiales sobre la lámina libre, utilizando secuencias de video georreferenciadas y algoritmos de correlación espacial (Fujita et al., 1998; Muste et al., 2008). Su carácter no intrusivo, la flexibilidad para operar desde márgenes o infraestructura existente y su aplicabilidad durante eventos hidrológicos extremos la posicionan como una técnica especialmente pertinente para países con recursos limitados.

La adopción de LSPIV en El Salvador representa la posibilidad de mejorar el desarrollo de curvas de calibración en estaciones hidrométricas, fortalecer la caracterización de estructuras hidráulicas y optimizar la modelación de flujos en superficie en tramos con geometrías irregulares o difícil acceso. Además, esta técnica ofrece la posibilidad de capturar variaciones espaciales de la velocidad que normalmente no se obtienen mediante métodos puntuales tradicionales, permitiendo así un entendimiento más integral de la dinámica fluvial y del transporte de sedimentos. No obstante, su implementación requiere considerar factores críticos como la estabilidad geométrica de las tomas de video, la adecuada resolución espacial y temporal, la calibración fotogramétrica y la sensibilidad a condiciones de iluminación o turbulencia superficial, los cuales han sido ampliamente discutidos en la literatura especializada (Jodeau et al., 2008; Tauro et al., 2016). A pesar de estas limitaciones, el potencial de

LSPIV para complementar los sistemas de monitoreo hidrológico convencionales se alinea con las recomendaciones internacionales que promueven la integración de tecnologías innovadoras para la observación hidrometeorológica, particularmente en países en desarrollo.

### III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

#### a. Diseño general del estudio

##### 1) Objetivos

El objetivo principal del estudio está orientado a evaluar la aplicabilidad y desempeño de la técnica LSPIV para la estimación de velocidades superficiales y caudales en una estación de la red hidrométrica del MARN, con el propósito de explorar su potencial como alternativa no intrusiva a los métodos hidrométricos convencionales. De manera complementaria, se busca integrar la información obtenida mediante LSPIV con observaciones de campo, a fin de validar los resultados y determinar la coherencia hidráulica de las estimaciones generadas.

##### 2) Enfoque experimental

El diseño metodológico se plantea bajo un enfoque experimental, basado en la adquisición de secuencias de video y mediciones hidrométricas en condiciones reales de escorrentía. El experimento incluye la captura de imágenes desde tres ángulos de observación definidos, la lectura simultánea del nivel del agua mediante una escala limnimétrica instalada en el sitio y la obtención de información geométrica del cauce mediante levantamiento topográfico. Este enfoque permitió evaluar de forma integral el rendimiento del método LSPIV en un entorno operativo, integrando aspectos ópticos, geométricos e hidrodinámicos.

##### 3) Análisis durante eventos de crecida.

Para capturar la dinámica hidráulica representativa del canal, las observaciones se realizaron durante eventos de crecida, cuando los patrones de flujo superficial presentan mayores velocidades y variabilidad espacial. En cada campaña se obtuvieron secuencias de video, niveles observados y mediciones de flotadores, lo que permitió construir conjuntos de datos completos para el procesamiento posterior. Estas observaciones en condiciones de caudal elevado permitieron evaluar la sensibilidad de la técnica frente a fluctuaciones del flujo, variaciones en la lámina libre y condiciones operativas reales, constituyendo una base sólida para el análisis y validación de los resultados.

## b. Área de estudio

### 1) Descripción del área de estudio.

El área de estudio corresponde a la estación hidrométrica Beloso, ubicada sobre la corriente Arenal Monserrat dentro de la cuenca del río Acelhuate, una de las unidades hidrográficas más relevantes en el sistema de drenaje del Área Metropolitana de San Salvador. La estación se localiza en las coordenadas  $13^{\circ}41'34.8''$  N,  $89^{\circ}11'27.6''$  O, en un tramo de corriente que drena una superficie de  $55.2 \text{ km}^2$ , parte de los  $720.54 \text{ km}^2$  totales de la cuenca (Figura 5).



Figura 5. Ubicación del área de estudio en la estación hidrométrica Beloso (cuenca Acelhuate). Fuente: MARN.

Esta cuenca presenta una marcada variación altitudinal, desde  $245 \text{ m s.n.m.}$  hasta  $1,826 \text{ m s.n.m.}$  condicionando una respuesta hidrológica rápida con ascensos súbitos en el nivel y caudal durante eventos de precipitación intensa. En el sitio de estudio, el cauce corresponde a un canal revestido en concreto, típico de los segmentos urbanos del Arenal Monserrat. La geometría rígida y estable del canal constituye una ventaja para la aplicación de técnicas de estimación de velocidad superficial, al minimizar la influencia de procesos morfodinámicos que puedan modificar la sección hidráulica o la rugosidad del cauce.

### 2) Criterios de selección.

La elección de la estación Beloso se basó en un conjunto de criterios hidrológicos, operativos y logísticos que la posicionan como un sitio adecuado para la aplicación y evaluación de técnicas LSPIV. Desde la perspectiva hidrológica, el sitio permite capturar la dinámica de un cauce urbano con respuesta rápida, representativo de procesos de generación de caudal y transporte superficial en cuencas fuertemente intervenidas. La existencia de un canal revestido en concreto elimina variaciones geométricas asociadas a erosión, sedimentación o cambios en la morfología del cauce, lo que favorece la consistencia en la interpretación de mediciones ópticas.

Operacionalmente, la estación se encuentra en funcionamiento desde 2009, aunque no cuenta con una curva de gasto validada, lo que subraya la necesidad de metodologías alternativas o complementarias que contribuyan a la mejora de la hidrometría local. Su ubicación dentro del Área Metropolitana de San Salvador representa una ventaja estratégica al ofrecer accesibilidad inmediata, visibilidad adecuada del cauce, infraestructura de apoyo (incluyendo parqueo municipal) y condiciones de seguridad relativamente favorables, elementos que facilitan tanto la adquisición de imágenes como las labores técnicas de mantenimiento y verificación. En conjunto, estas características convierten a la estación Beloso en un punto idóneo para la implementación de mediciones de velocidad superficial mediante LSPIV y para la evaluación de su aplicabilidad en entornos urbanos.

### c. Selección de puntos de observación

Para garantizar una cobertura óptima del campo visual y evaluar el desempeño del método LSPIV bajo diferentes configuraciones geométricas, se seleccionaron tres sitios de captura que permiten registrar el flujo desde ángulos complementarios. El primer punto de observación se ubicó aguas arriba de la estación de medición, sobre un puente con orientación de cámara dirigida hacia aguas abajo, siguiendo la dirección del flujo (designación Puente 1). Esta vista longitudinal favorece la identificación de trazadores superficiales que se desplazan alineados con el eje principal del cauce y proporciona una perspectiva estable para el seguimiento de patrones de desplazamiento. El segundo ángulo de captura se estableció de forma lateral, en el margen derecho del canal, permitiendo registrar la lámina libre perpendicularmente al sentido del flujo (designación Acera). Esta vista transversal contribuye a mejorar la definición de las estructuras superficiales y posibilita la observación de variaciones espaciales en la velocidad a lo ancho del canal, especialmente útiles para evaluar la calidad de la ortorrectificación y la respuesta del algoritmo de correlación en zonas con gradientes laterales de velocidad. Finalmente, se definió un tercer punto de observación aguas abajo de la estación de medición, también desde un puente, pero con orientación de cámara hacia aguas arriba (designación Puente 2). Esta configuración permite capturar el flujo en sentido opuesto al desplazamiento de los trazadores, lo cual es valioso para contrastar la consistencia de las mediciones obtenidas desde diferentes ángulos y minimizar posibles sesgos asociados a la direccionalidad del movimiento relativo entre cámara y partículas.

En conjunto, estos tres ángulos de captura proporcionan un conjunto robusto de vistas complementarias que fortalecen la calidad de las secuencias registradas y permiten una evaluación integral del rendimiento de la técnica LSPIV bajo diferentes geometrías de observación (Figura 6).



Figura 6. Ángulos de captura establecidos para la sección de medición.

#### d. Flujo metodológico del análisis PIV

El análisis LSPIV desarrollado en este estudio sigue un proceso que inicia con la captura de secuencias de video y la lectura simultánea del nivel del agua. Posteriormente, las imágenes son sometidas a estabilización y ortorrectificación, utilizando puntos de control obtenidos mediante levantamiento topográfico para garantizar su correspondencia métrica en el plano del flujo. Una vez generadas las ortoimágenes, se establece una malla de cálculo junto con las ventanas de interrogación y búsqueda, a partir de las cuales se aplican algoritmos de correlación cruzada para estimar los desplazamientos de patrones superficiales entre fotogramas consecutivos. Los vectores obtenidos se filtran y validan mediante mediciones independientes con flotadores, con el fin de descartar estimaciones erróneas. Finalmente, los vectores depurados se integran con la geometría hidráulica del cauce para calcular el caudal correspondiente a cada evento observado (Figura 7).

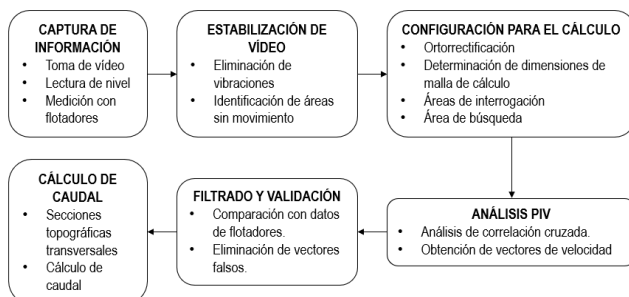


Figura 7. Flujo metodológico del análisis PIV.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### a. Equipos y materiales utilizados

En la investigación se emplearon equipos y materiales que garantizaron la calidad geométrica y fotográfica requerida para el procesamiento hidrodinámico. La adquisición de imágenes se realizó utilizando una cámara integrada en un dispositivo Samsung Galaxy S20 FE, configurada para grabar a una resolución de 1080p y una frecuencia de 60 FPS, parámetros que permiten capturar adecuadamente la dinámica superficial del flujo. Con el fin de asegurar la estabilidad de las secuencias de video y minimizar vibraciones u oscilaciones durante la captura, la cámara fue montada sobre un trípode ubicado estratégicamente en cada uno de los puntos de observación (Figura 8).



Figura 8. Ubicación de equipo de captura de imágenes en un punto estratégico de observación.

Para la medición del nivel del agua se instaló una escala limnigráfica, visible desde los distintos ángulos de captura, lo que permitió registrar el nivel hidráulico asociado a cada secuencia de video (Figura 9).



Figura 9. Colocación de referencia limnigráfica para la lectura del nivel durante las observaciones de tránsito de crecidas.

Asimismo, con el objetivo de obtener los puntos de control terrestre (GCPs) y las secciones transversales del canal, se empleó una estación total Trimble con una precisión angular de 5", cuyos datos topográficos constituyeron la base para la ortorrectificación de las imágenes y para la integración geométrica del cálculo de caudal (Figura 10).



Figura 10. Estación Total empleada en el levantamiento topográfico del canal de estudio.

El procesamiento de las imágenes, la estabilización, la ortorrectificación y el cálculo de los vectores de velocidad se realizaron utilizando software especializado para análisis LSPIV, el cual permitió aplicar algoritmos de correlación cruzada, configurar las áreas de interrogación y búsqueda, filtrar vectores espurios y obtener los campos finales de velocidad superficial necesarios para la estimación del caudal.

#### b. Captura de datos en campo

Con el objetivo de poner a prueba la operatividad del método y evaluar el desempeño de las aplicaciones LSPIV en condiciones reales de escorrentía, se realizaron campañas de observación durante distintos eventos de crecida ocurridos en los meses de junio, agosto, septiembre y octubre (Figuras 11 y 12). Estas visitas permitieron registrar información hidrométrica y videográfica bajo condiciones dinámicas del flujo, aspecto fundamental para validar el enfoque metodológico.

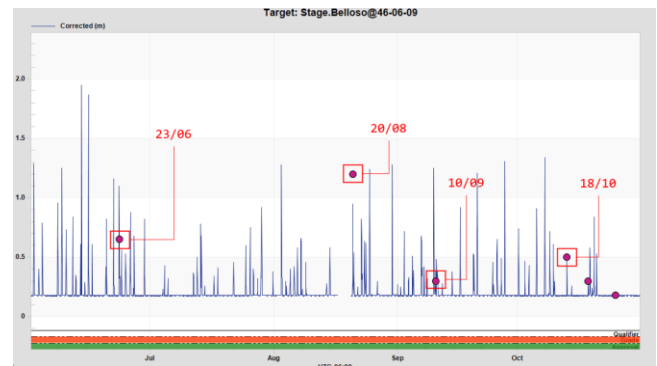


Figura 11. Observaciones realizadas durante la ocurrencia de crecidas, mostradas sobre el hidrograma registrado por la estación Belloso.



Figura 12. Condiciones de flujo observadas durante la ocurrencia de crecidas en la zona de estudio

#### c. Levantamiento topográfico y puntos de control

Para garantizar la fidelidad métrica de las imágenes ortorrectificadas y cumplir con los requerimientos geométricos de la técnica LSPIV, se llevó a cabo un levantamiento topográfico de alta precisión utilizando una estación total Trimble, con una exactitud angular de 5". El objetivo principal de este levantamiento fue el levantamiento de secciones transversales y la obtención de los puntos de control terrestre (GCPs) necesarios para definir el sistema de referencia real en el proceso de ortorrectificación, permitiendo corregir las distorsiones inherentes a la perspectiva y asociar cada pixel de la imagen a coordenadas métricas en el plano del flujo.

Los GCPs fueron distribuidos estratégicamente en ambas márgenes y en elementos estructurales visibles en las imágenes, asegurando que la geometría del canal quedara adecuadamente representada en el modelo de transformación. Esta información permite generar ortoimágenes con resolución espacial uniforme y compatibles con los algoritmos de correlación cruzada empleados en el análisis LSPIV. En el establecimiento de estos

puntos, se definieron marcas visibles y estables que pudieran identificarse fácilmente en los videos capturados (Figura 13).

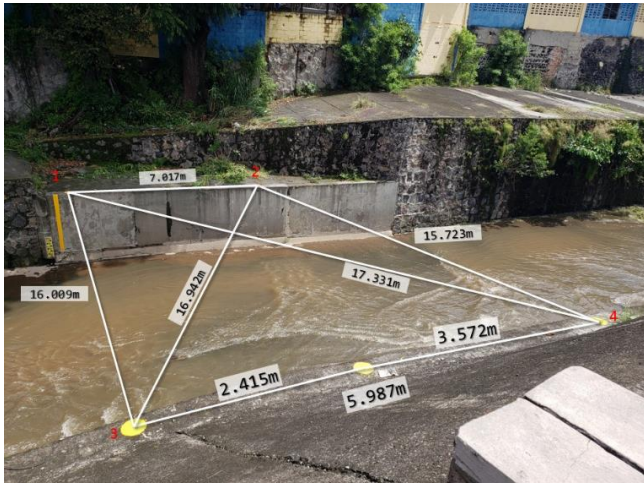


Figura 13. Puntos de control terrestre (GCPs) definidos en el canal de medición.

De manera complementaria, durante la campaña de campo se ejecutó el levantamiento de secciones transversales en los tramos correspondientes a la zona de interés (Figura 14). Estas secciones permiten caracterizar la geometría hidráulica del canal y constituyen un insumo fundamental para el cálculo del caudal, ya que proporcionan el área transversal que se combina con el nivel observado durante la adquisición de video y con la velocidad superficial estimada mediante LSPIV. La integración de la batimetría levantada con las velocidades superficiales procesadas posibilita la aplicación de coeficientes de corrección vertical y métodos de integración hidráulica para estimar el caudal total, cumpliendo así con los procedimientos establecidos para aforos indirectos basados en técnicas ópticas.

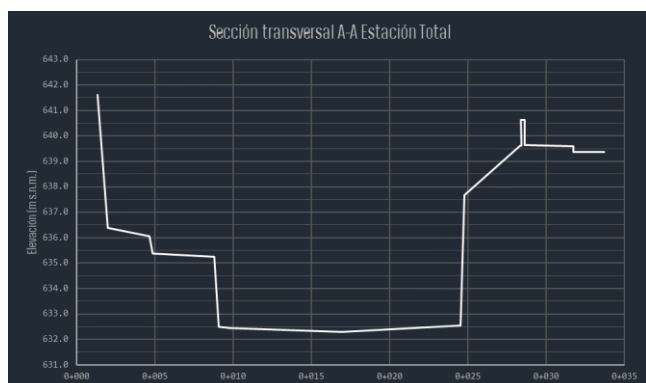


Figura 14. Sección topográfica medida durante la adquisición de información de referencia en campo.

#### d. Estabilización de imágenes

El proceso de estabilización de imágenes en Fudaa-LSPIV constituye una etapa preliminar esencial para garantizar la consistencia espacial de las secuencias

de video antes de aplicar los algoritmos de correlación cruzada. Esta herramienta permite corregir movimientos no deseados de la cámara (vibraciones, desplazamientos mínimos o variaciones angulares) mediante la identificación de puntos fijos en la escena, identificando dentro de las imágenes las zonas que deberían tener movimiento (la zona de movimiento del flujo). El software calcula estas transformaciones a partir de puntos de control visibles en el entorno, compensando desplazamientos y rotaciones para cada fotograma. Como resultado, se obtiene una serie de imágenes estabilizadas que preservan la geometría real del cauce y reducen errores en la etapa posterior de ortorrectificación y análisis LSPIV. El efecto de este proceso se ilustra en la Figura 15, donde se observa la demarcación en rojo de la zona con presencia de agua (zona con movimiento) que permite identificar puntos sin movimiento, mejorando la estabilidad visual y la coherencia espacial de la escena tras la corrección aplicada.

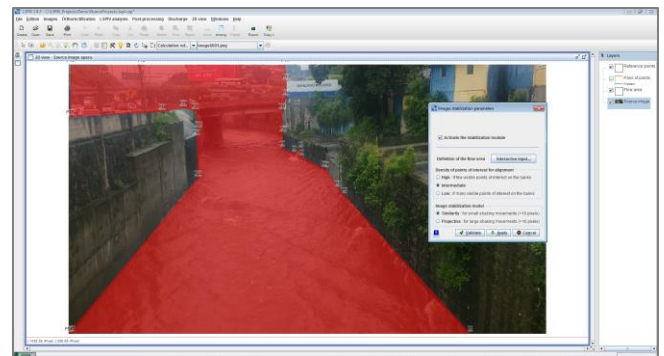


Figura 15. Delimitación del área de flujo, como paso esencial en la estabilización de imágenes.

#### e. Ororrectificación

Una vez completada la estabilización de imágenes, se realiza dentro del software el proceso de ortorrectificación, cuyo objetivo es transformar cada fotograma desde la perspectiva original de la cámara hacia un sistema métrico homogéneo en el plano del flujo. Para ello, el software utiliza los puntos de control terrestre (GCPs) obtenidos en campo, los cuales sirven como referencias fijas para calcular la relación geométrica entre la imagen y el espacio real. El software corrige los efectos de perspectiva, inclinación de la cámara y distorsión geométrica, generando una ortoimagen en la que las distancias horizontales representan proporciones reales dentro del cauce (Figuras 16 y 17). Este proceso permite asignar a cada píxel una ubicación precisa en coordenadas métricas, condición indispensable para la correcta interpretación de los desplazamientos detectados por correlación cruzada y, en última instancia, para la obtención de

campos de velocidad superficial con validez hidrodinámica.

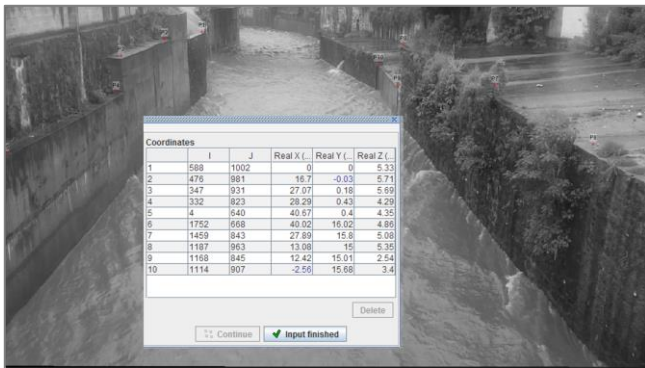


Figura 16. Establecimiento de puntos de control (GCPs) dentro de la imagen capturada, para realizar la ortorrectificación.

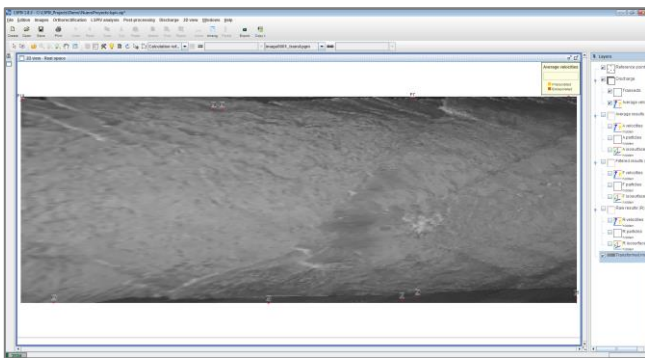


Figura 17. Producto final de la ortorrectificación realizada en el software Fudaa LSPiV.

#### f. Configuración del cálculo de vectores de velocidad

Con la ortorrectificación completada, la estimación de los vectores de velocidad superficial se realiza mediante el análisis de pares consecutivos de imágenes utilizando algoritmos de correlación cruzada, los cuales requieren la definición previa de una malla de cálculo y de los parámetros asociados a las Áreas de Interrogación (IA) y Áreas de Búsqueda (SA). Para este estudio se configuró una malla de 20 puntos x 20 puntos distribuidos uniformemente a lo largo del canal, garantizando una cobertura espacial adecuada considerando la resolución de las imágenes y las dimensiones del cauce. Cada punto de la malla se asocia a un IA de 14 píxeles, dentro del cual se identifican patrones que se comparan con los presentes en la imagen siguiente. La búsqueda del desplazamiento óptimo se realizó dentro de una SA de geometría rectangular, definida con 10 píxeles de ancho y 15 píxeles de largo, esta última dimensión extendida en la dirección principal del flujo para capturar de forma más precisa los desplazamientos longitudinales típicos de un canal revestido.

A partir de esta configuración, el máximo de la función de correlación para cada par de imágenes determina el desplazamiento del patrón superficial, y al dividir dicho valor entre el intervalo temporal se obtiene la velocidad superficial correspondiente. No obstante, este proceso puede generar vectores falsos en zonas con bajo contraste, ausencia de trazadores o interferencias visuales, por lo que se aplicó un filtrado basado en mediciones independientes con la técnica de flotadores, utilizando estas observaciones como referencia para descartar vectores inconsistentes o físicamente no plausibles. De esta manera se depuró el campo vectorial final, conservando únicamente los vectores que representan de forma coherente la dinámica observada del flujo. La Figura 18 muestra un ejemplo del campo de vectores resultante tras la aplicación del procedimiento de cálculo y filtrado.

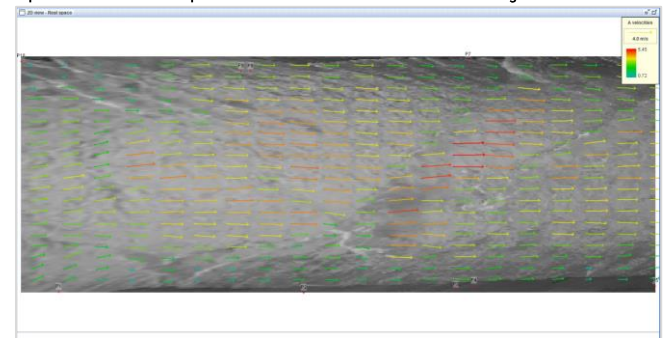


Figura 18. Campo de vectores de velocidades promedio obtenidas del análisis.

#### g. Cálculo de caudal

Una vez obtenido el campo depurado de vectores de velocidad superficial, se procede al cálculo del caudal, integrando la información hidrodinámica con la geometría hidráulica del canal. En esta etapa se incorporan al software una o varias secciones transversales levantadas topográficamente, las cuales representan la morfología real del cauce y permiten relacionar el nivel observado con el área hidráulica efectiva. La Figura 19 ilustra el proceso de incorporación de estas secciones transversales y su asociación con el nivel registrado durante la campaña.

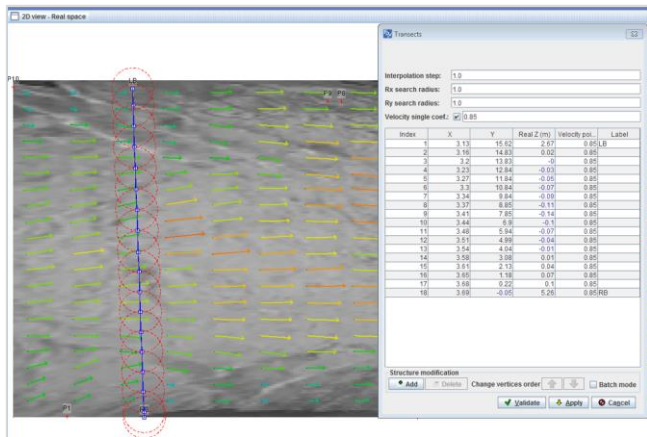


Figura 19. Definición de la sección transversal con los puntos medidos en campo y configuración de interpolaciones y radio de búsqueda.

A partir del área correspondiente para ese nivel y de la velocidad superficial estimada mediante LSPIV, se calcula el caudal utilizando una aproximación del tipo:

$$Q = A * V_m$$

Dónde:

Q : Caudal en m<sup>3</sup>/s

A: Área hidráulica obtenida de la sección transversal (m<sup>2</sup>)

V<sub>m</sub>: Velocidad media (m/s)

El resultado final del caudal integrado se muestra en la Figura 20, donde se presenta el valor calculado para la sección transversal incorporada.

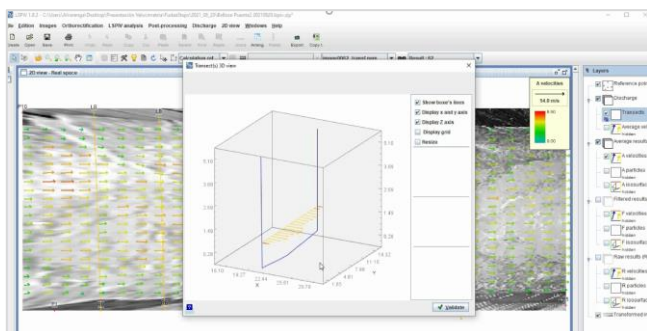


Figura 20. Cálculo del caudal en la sección transversal definida para el cauce.

## V. RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan de manera consolidada los resultados obtenidos para cada una de las observaciones realizadas durante los distintos eventos de crecida analizados. La tabla resume los niveles registrados, los campos de velocidad superficial procesados, los vectores depurados tras el filtrado y los caudales estimados a partir de la integración con las secciones transversales levantadas. Esta síntesis permite comparar el

desempeño del método en diferentes condiciones hidráulicas y evaluar la coherencia interna entre las mediciones ópticas, las observaciones con flotadores y la geometría hidráulica del canal, proporcionando una base objetiva para interpretar la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos mediante la técnica LSPIV.

TABLA 1

RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA LSPIV UTILIZANDO EL SOFTWARE FUDAA.

Fecha	Nivel (m)	Caudal m <sup>3</sup> /s (LSPIV)
23/06/2021	0.65	31.5
20/08/2021	1.2	70.2
10/09/2021	0.3	10.6
18/10/2021	0.3	8.15

Durante el análisis de los resultados se tomó en consideración que, en la observación correspondiente al mes de octubre, las condiciones hidráulicas en el sitio presentaron fluctuaciones significativas del flujo en la zona donde se localiza la escala limnimétrica. Estas oscilaciones rápidas en la lámina libre dificultaron la lectura precisa del nivel, generando una incertidumbre considerable tanto en la determinación del valor de referencia del nivel del agua como en los cálculos hidrodinámicos subsecuentes. En consecuencia, los resultados asociados a esta medición deben interpretarse con cautela, reconociendo que la variabilidad del flujo en ese momento introdujo un margen adicional de error en la estimación del caudal y en la coherencia de los vectores de velocidad calculados.

A partir de los resultados obtenidos mediante el procesamiento LSPIV y la integración con las secciones transversales levantadas, se elaboró una curva de gasto preliminar para la estación Beloso, con el propósito de disponer de una relación funcional entre nivel y caudal que permita mejorar las estimaciones hidrométricas en este punto de control. La información topográfica recopilada permite establecer que el rango de aplicación de la curva puede extrapolarse hasta niveles de crecida que alcancen aproximadamente los 3 m, dado que para este valor aún se mantiene una representación geométrica confiable del canal revestido. La ecuación propuesta para la curva de gasto es la siguiente:

$$Q = 59.6 (H - 0.06)^{1.2}$$

Dónde:

Q: Caudal calculado (m<sup>3</sup>/s)

H: Nivel registrado (m)

La Figura 21 presenta la curva de gasto trazada, construida a partir de los pares nivel-caudal derivados de las diferentes observaciones realizadas. Esta relación constituye una base para futuros

procesos de validación y refinamiento, así como un insumo operativo para la gestión hidrológica en el sitio.

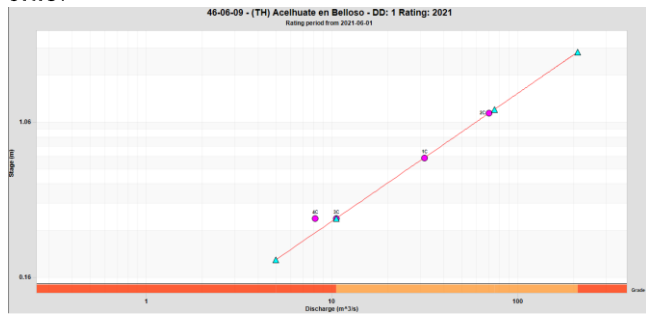


Figura 21. Visualización gráfica de la curva de gasto propuesta para la estación Belloso.

TABLA 2

COMPARATIVA DE LOS CAUDALES CALCULADOS CON FUDAA Y LOS CAUDALES OBTENIDOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA CURVA DE GASTO PROPUESTA.

Fecha	Nivel (m)	Caudal m3/s (LSPIV)	Caudal calculado m3/s (Curva de gasto)	Diferencia
23/06/2021	0.65	31.5	31.64	-0.14
20/08/2021	1.2	70.2	69.75	0.45
10/09/2021	0.3	10.6	10.75	-0.15
18/10/2021	0.3	8.15	10.75	-2.6

## VI. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación del análisis LSPIV constituye una alternativa no intrusiva, eficiente y técnicamente viable para la estimación de caudales en canales abiertos, particularmente cuando se utiliza un software especializado que integra procedimientos de estabilización, ortorrectificación y correlación cruzada de alta resolución. La metodología implementada permitió generar campos de velocidad superficial consistentes y, al integrarlos con la geometría hidráulica del canal, obtener estimaciones de caudal acordes con el comportamiento hidrodinámico observado. Se constató, sin embargo, que la calidad final de los resultados depende de manera crítica del uso de datos de contraste, como las mediciones realizadas con flotadores, las cuales son indispensables para identificar y eliminar vectores de velocidad erróneamente estimados que podrían distorsionar la interpretación del flujo.

Asimismo, los resultados ponen en evidencia que la aplicación de LSPIV en estaciones ubicadas en cauces naturales, sujetos a procesos de erosión, sedimentación y cambio morfológico, requerirá la actualización más frecuente de las secciones transversales para garantizar una integración hidráulica adecuada y mantener la validez de las

estimaciones de caudal. Del mismo modo, se destaca la necesidad de conservar, resguardar y dar mantenimiento a los puntos de control terrestre (GCPs) utilizados para la ortorrectificación, ya que la estabilidad geométrica de estos puntos influye directamente en la precisión espacial de los vectores de velocidad y, en consecuencia, en la confiabilidad del cálculo de caudal. En conjunto, el estudio confirma que LSPIV, combinado con buenas prácticas hidrométricas y control geométrico adecuado, constituye una herramienta valiosa para complementar y fortalecer los métodos tradicionales de aforo en contextos operativos, siendo aplicable en las estaciones de la red hidrométrica de MARN El Salvador.

## RECOMENDACIONES

A partir de la experiencia obtenida, se formulan las siguientes recomendaciones operativas y metodológicas para futuras aplicaciones de LSPIV:

- Seleccionar una ubicación con visibilidad completa del ancho de la sección de calibración y de los puntos de referencia empleados para la ortorrectificación.
- Asegurar una ubicación con visibilidad de la escala limnimétrica, de forma que sea posible asociar cada secuencia de video con el nivel hidráulico correspondiente.
- Trabajar preferentemente en una sección transversal estable, que se conserve en el tiempo. En caso de cauces naturales, actualizarla con mayor frecuencia.
- Utilizar referencias espaciales duraderas que puedan mantenerse y verificarse periódicamente para preservar la calidad de la ortorrectificación.
- Escoger un tramo de medición sin cambios significativos de dirección del flujo, con el fin de minimizar distorsiones geométricas en la captura de video.
- Priorizar sitios con condiciones de seguridad y accesibilidad, que faciliten la instalación del equipo y la toma de registros de manera rutinaria.
- Garantizar la estabilidad del video, preferiblemente mediante el uso de trípode, y asegurar una duración mínima de 10 segundos para la obtención de un número suficiente de pares de imágenes correlacionables.
- Procurar que los videos cuenten con características adecuadas, idealmente resolución HD (1080 × 1920) y una frecuencia de grabación mínima de 30 FPS, a fin de mejorar la calidad fotogramétrica y el rendimiento del algoritmo de correlación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adrian, R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*. <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0991-7>
- EDF-Fudaa. (2024). FUDAA – Hydraulics and environmental modeling tools. <https://fudaa.fr/>
- Fujita, I., & Komura, S. (1994). Application of video image analysis for measurements of river–surface flows. *Proceedings of the Hydraulic Engineering Conference*.
- Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*.
- Jodeau, M., Hauet, A., Le Coz, J., & Bodart, G. (2019). Fudaa-LSPIV version 1.7.1: User manual (Document version 27/08/2019). EDF & Irstea.
- Jodeau, M., Hauet, A., Le Coz, J., Bercovitz, Y., & Lebert, F. (2017). Laboratory and field LSPIV measurements of flow velocities using Fudaa-LSPIV, a free user-friendly software. In *HydroSenSoft: International Symposium and Exhibition on Hydro-Environment Sensors and Software*. IAHR. ISBN 978-90-824846-2-5.
- Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., & Dramais, G. (2008). Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*.
- Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*.
- Organización Meteorológica Mundial. (2008). *Guía de prácticas hidrológicas, vol. I: Hidrología – De la medición a la información hidrológica* (6.ª ed.). Organización Meteorológica Mundial. <https://library.wmo.int/idurl/4/35804>
- Organización Meteorológica Mundial. (2010). *Guía de prácticas hidrológicas (OMM-Nº 168)*.
- Tauro, F., Piscopia, R., & Grimaldi, S. (2017). Streamflow observations from cameras: large-scale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry? *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2017WR020848>
- Tauro, F., Porfiri, M., & Grimaldi, S. (2016). Surface flow measurements from drones: A new tool for riverine environments. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- U.S. Geological Survey. (2017). *Techniques and Methods 3–A23: Surface-Water Measurement*. U.S. Department of the Interior.
- Wieneke, B. (2017). PIV uncertainty quantification and beyond. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26244.42886>