

## **Informe Final del Proyecto Interno HC-1104.1**

*Evaluación de dos técnicas emergentes para medir la velocidad del agua*

### **Actividad 1:**

# **Evaluación de la técnica de LSPIV para estimar la velocidad superficial del agua en obras hidráulicas**

**Subcoordinación de Hidráulica Ambiental**

**Serge Tamari  
Jorge Cinsel Gutiérrez**

**Diciembre de 2011**

**Nota:** *este informe corresponde al avance de la Tesis de Maestría de Jorge Cinsel Gutiérrez (IPN).*

# Índice

## **1. Introducción**

- 1.1 Motivaciones
- 1.2 Objetivo

## **2. Estado del arte**

- 2.1 Técnica estándar de PIV
- 2.2 Técnica de LSPIV
- 2.3 Evolución de la técnica de LSPIV

## **3. Marco Teórico**

- 3.1 Visualización del flujo
- 3.2 Captura de imágenes
- 3.3 Procesamiento de imágenes
- 3.4 Verificación del programa Mat\_LSPIV

## **4. Materiales y métodos**

- 4.1 Pruebas preliminares
- 4.2 Pruebas en condiciones de flujo uniforme
- 4.3 Pruebas en condiciones de flujo más complejo

## **5. Resultados**

- 5.1 Pruebas en condiciones de flujo uniforme
- 5.2 Pruebas en condiciones de flujo más complejo

## **Bibliografía**

# 1. Introducción

## 1.1 Motivaciones

Las mediciones de flujo sirven para numerosas aplicaciones de ingeniería hidráulica en relación con los cuerpos de agua, por ejemplo, la dispersión de contaminantes en ríos y zonas costeras, los problemas asociados con el comportamiento de las cuencas hidrográficas (erosión, sedimentación, inundaciones y la degradación del medio ambiente), y los planes de mitigación de hielo, por mencionar algunos (Fujita et al., 1998). En la hidráulica, la asignación de velocidades en flujos superficiales es útil para definir el gasto, la influencia de nuevos elementos y estructuras en los componentes de la velocidad, como vertederos, obras de toma, la construcción de obras en ríos (Bieri et al., et al 2009).

Las mediciones de descarga se realizan mediante diversas técnicas. Muy a menudo, un medidor de corriente o molinete (es decir, un dispositivo mecánico formado por hélices o tazas rotatorias) se sumerge en el agua para medir la velocidad del flujo en una sección. Desde hace 30 años, se utilizan equipos acústicos y electromagnéticos para medir la velocidad del agua. Para poder funcionar, estos equipos al igual que los molinetes deben sumergirse dentro del agua, lo cual no siempre es práctico: por una parte, los sensores de los equipos sufren daños (debido a problemas de corrosión y/o incrustación), y por otra, en ocasiones es complicado (e inclusive peligroso) acercarse a un flujo para sumergir un instrumento. Fujita et al., (2007) menciona que en septiembre de 2005 en Japón un trabajador se cayó en un río, mientras que media descarga de inundación. Por lo anterior, llega a ser deseable contar con instrumentos que puedan medir la velocidad del agua sin ser sumergidos (sistemas no intrusivos).

En las últimas 3 décadas, una nueva generación de instrumentos basados en imágenes, agrupados bajo el nombre genérico de velocimetría por imágenes de partículas (PIV), han aprovechado los recientes acontecimientos en la óptica, el láser, la electrónica, los equipos de video y las computadoras para la medición del campo de velocidades y la asignación de campos de flujo en una variedad de aplicaciones en laboratorios de mecánica de fluidos (Adrian 1991, Raffel et al 1998). Sistemas de imágenes pueden medir campos de velocidad de flujo bidimensional usando trazadores de flujo como partículas sólidas, burbujas o patrones impulsados por turbulencias producidos en el caudal del río (Creutin et al., 2003)

Una técnica emergente, no intrusiva para obtener velocidades superficiales en flujos de agua es la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala “LSPIV”, con la cual es posible medir la distribución de velocidad de superficie sobre un río entero (Fujita et al., 1997, 1998; Creutin et al., 2003; Hauet et al., 2008b; Jasek et al., 2001) o ser utilizada en modelos a escala en laboratorio (Muste et al., 2004a, 2008b; Bieri et al., 2009; Fox y Belcher, 2011) o en pequeños ríos (Bradley et al 2002).

### **1.3 Objetivo**

La importancia de contar con técnicas e instrumentos para medir velocidades superficiales de flujos en escurrimientos fluviales y obras hidráulicas motivo a evaluar la técnica de LSPIV que ha sido utilizada en las últimas dos décadas. El objetivo de esta investigación es poner en operación la técnica de LSPIV para estimar las velocidades superficiales del agua en canales y modelos hidráulicos de laboratorio. Además, evaluar los alcances y limitaciones de la técnica para ser aplicada en campo y laboratorio, así como evaluar la incidencia de la luz sobre la superficie del agua para ser utilizada como trazador.

## 2. Estado del arte

### 2.1 Técnica estándar de PIV

La técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) es una técnica que permite medir campos de velocidades de un fluido utilizando un procesamiento de imágenes y ha sido utilizada intensamente durante los últimos 30 años (Adrian 1991) por el hecho de que las técnicas de grabación analógica de imágenes han sido reemplazadas por técnicas digitales. Los sistemas convencionales de PIV implican 4 grandes componentes: iluminación, siembra de trazadores, grabación de imágenes y procesamiento de imágenes.

#### 2.1.1 Principios de PIV

La Velocimetría de partículas basado en imágenes digitales se basa en la ecuación

$$\text{velocidades} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} \quad \text{Ec. (1)}$$

El principio general de PIV es iluminar partículas para trazado de líneas en el campo de flujo de interés con un abanico de luz y adquirir dos imágenes del campo del flujo con una separación de tiempo conocida ( $\Delta t$ ). El campo de la dislocación determina el movimiento de las partículas entre las dos imágenes y dividiendo entre el tiempo se obtiene el campo de la velocidad. Para las imágenes expuestas la dislocación es determinada en nuestro caso por la correlación cruzada de las aéreas de interrogación correspondientes a las primeras y segundas imágenes. La localización del pico más alto de la correlación del plano corresponde a la dislocación más probable de la partícula en el área de interrogación. La velocidad del sub-píxel de dislocación es obtenida con una función gaussiana al pico de la correlación y encontrando la localización máxima exacta.

## 2.1.2 Procesamiento de imágenes

Uno de los programas utilizados para procesar las imágenes en PIV es FlowManager 3.5 el cual emplea la correlación cruzada (*Cross - Correlation*) para el análisis de dos imágenes cuya fórmula es la siguiente:

$$R_{II}(x,y) = \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-L}^L I(i,j)I'(i+x,j+y) \quad \text{Ec. (2)}$$

donde  $I(i,j)$  e  $I'(i+x,j+y)$  son las intensidades de luz registradas en cada área de interrogación en un tiempo  $t$  y otro  $t+\Delta t$  respectivamente para cada valor del corrimiento  $(x,y)$ .

El cálculo de la correlación cruzada aplicando la ecuación (2) resulta muy tedioso y extenso, necesitándose de un tiempo considerable en la obtención de los resultados, tal como lo comenta Raffel *et al.* (1988) en el inciso 5.4 de su libro *Particle Image Velocimetry*. La función de correlación cruzada puede calcularse también considerando el teorema de correlación, el cual establece que la correlación cruzada de dos funciones es equivalente a la multiplicación del conjugado complejo de sus transformadas de Fourier:

$$R_{II} \rightarrow \hat{I} \cdot \hat{I}'^* \quad \text{Ec. (3)}$$

En donde  $\hat{I}$  e  $\hat{I}'$  son las transformadas de Fourier de las funciones  $I$  e  $I'$  respectivamente. El programa Flow Manager 3.5 utiliza la transformada rápida de Fourier con el fin de llevar a cabo la correlación. El proceso se reduce a calcular dos transformadas de Fourier bidimensionales y realizar la multiplicación del complejo conjugado de cada par de coeficientes de Fourier correspondientes. Al resultado del conjugado de coeficientes de Fourier se le aplica la transformada inversa para obtener así la correlación cruzada. Teniendo en cuenta que se tienen datos discretos, usando la transformada rápida de Fourier se reduce considerablemente el tiempo de cómputo de las operaciones (Jaehne, 1997). Un resumen del procedimiento se muestra en la figura 2.1.

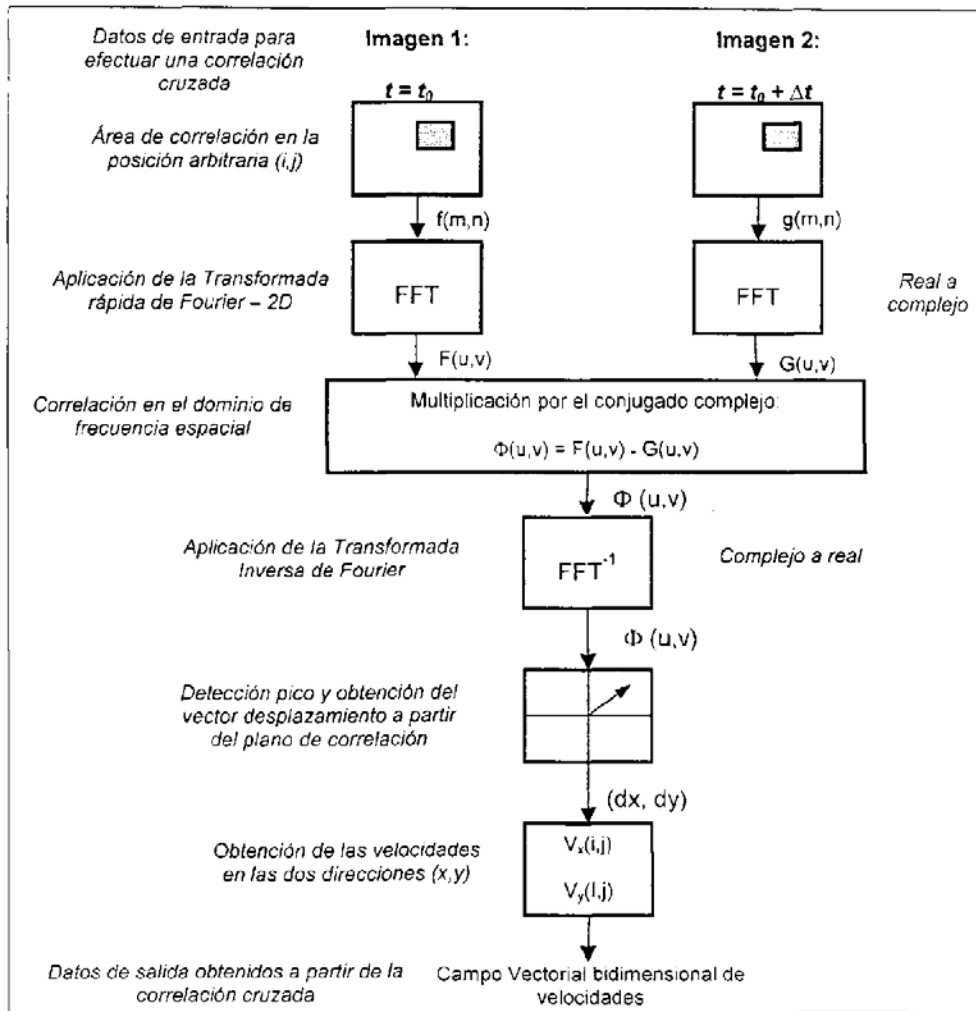


Figura 2.1 Esquema ilustrativo del proceso de correlación cruzada. (Guido 2003)

La implementación de la correlación cruzada utilizando las transformadas rápidas de Fourier implica pasar de un dominio o plano real a un plano complejo y al final traer nuevamente la información al plano real, esto último por medio de una transformada inversa.



En la figura 2.2 se aprecia la aplicación de la correlación cruzada a dos imágenes, a partir de lo cual se obtiene información sobre la dirección del movimiento de las partículas en cada área de interrogación y al final del proceso el vector de velocidad. Además muestra la existencia de muchos picos en el plano de correlación, de los cuales uno supera en magnitud a los demás. El pico de mayor altura y el segundo más alto sirven para que el programa efectúe la validación por alturas de picos.

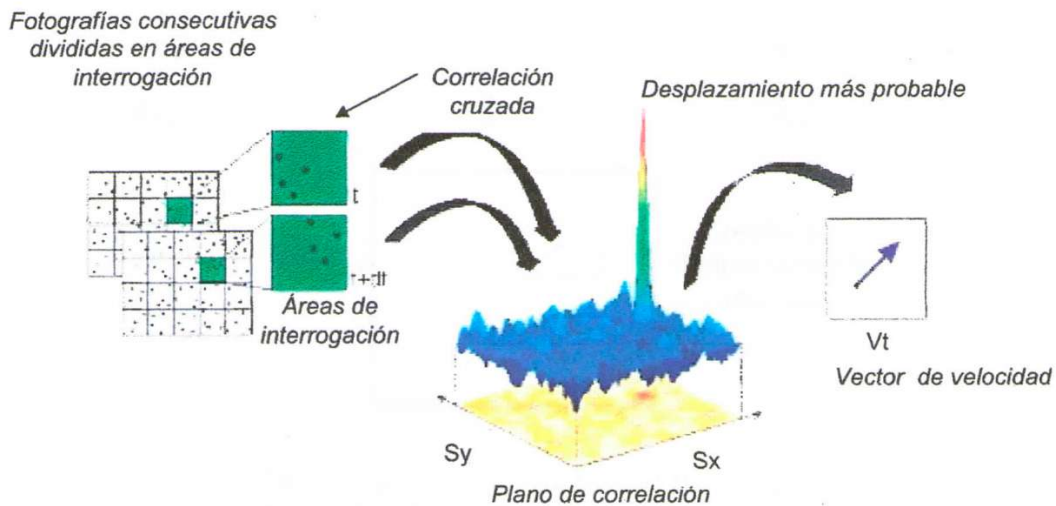


Figura 2.2 Esquema de aplicación de la correlación cruzada (Guido 2003).

Es de resaltar que el programa define un sistema coordenado X - Y en pixeles (convertible a milímetros) por medio del plano del flujo y la orientación de la cámara. La primera etapa de la técnica divide cada imagen en pequeñas áreas a las que se les conoce como áreas de interrogación (ver figura 2.3). Al interior de cada una de ellas se tendrán partículas cuyo número se recomienda no sea menor de cinco. El paso siguiente consiste en obtener un campo vectorial de desplazamientos lineales, donde cada vector es el resultado de la correlación que efectúa el programa en un área de interrogación entre dos imágenes consecutivas.

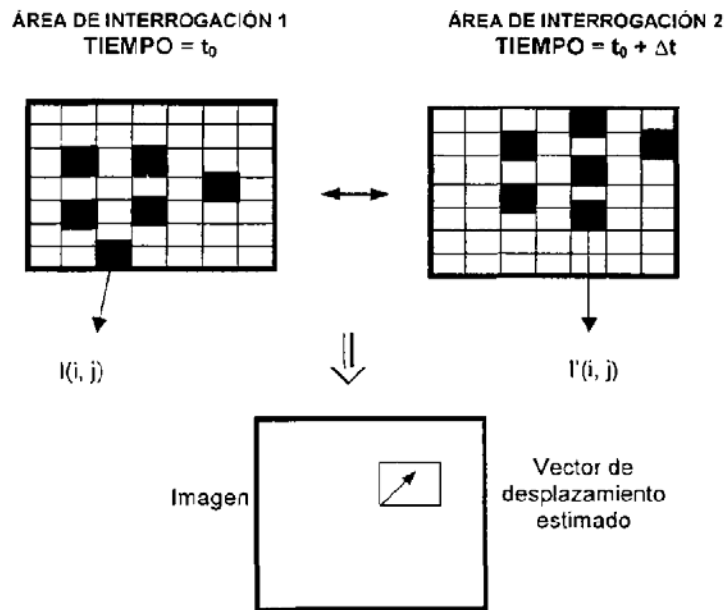


Figura 2.3 Esquema que muestra un par de imágenes divididas en áreas de interrogación.

Una de las implicaciones de la técnica es que se calcula un desplazamiento promedio de grupos de partículas. El tamaño de las áreas de interrogación deberían seleccionarse lo suficientemente pequeñas de tal forma que se minimicen los gradientes de desplazamiento. Las principales características que presenta el método de correlación cruzada son las siguientes:

- La correlación cruzada se realiza sobre áreas correspondientes sin ningún desplazamiento de la segunda imagen.
- El proceso de correlación cruzada se lleva a cabo sólo una vez durante la comparación de las áreas de interrogación.
- Solo se considera un tamaño de área de interrogación.

Tales características se convierten, en casos de fuertes gradientes de velocidad o bajo número de partículas, en verdaderas limitantes que obligan al uso de técnicas de correlación más eficientes.

## 2.2 Técnica de LSPIV

### 2.2.1 Componentes del sistema

La técnica PIV convencional implica 4 componentes: visualización del flujo, iluminación, grabación y procesamiento de las imágenes. Dado que LSPIV cubre grandes áreas obtenidas a través de imágenes oblicuas del flujo en superficie, es necesario un paso adicional: orto-rectificación de la imagen. La secuencia de mediciones de LSPIV se ilustra en la Figura 2.4.

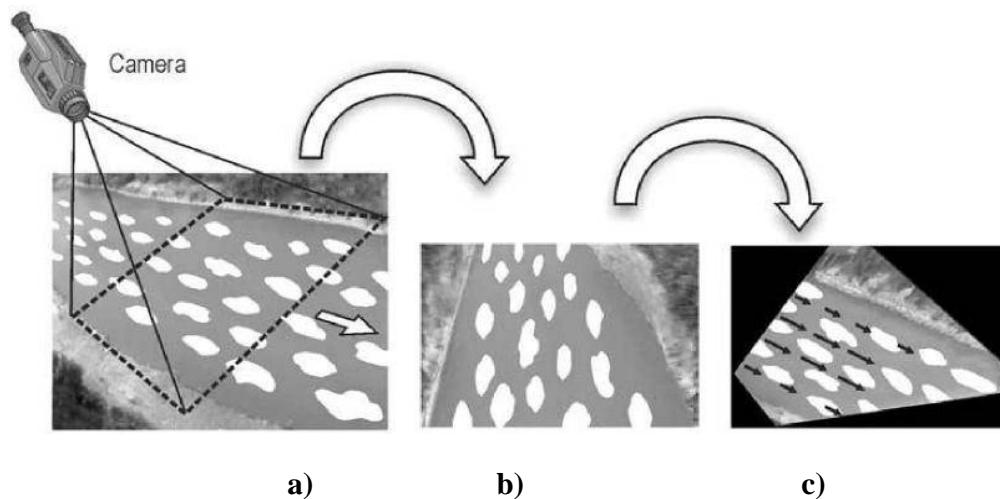


Figura 2.4. (Imagen tomada de Muste 2008): Secuencia de medición con LSPIV: (a) Imagen del área que va a ser medida (los patrones blancos indican los trazadores naturales o artificiales usados para la visualización de la superficie libre), (b) Imagen oblicua distorsionada, (c) imagen rectificada con los vectores de velocidad superpuestos sobre la imagen.

### **2.2.2 Visualización del flujo, iluminación y grabación de las imágenes**

En general las componentes de esta técnica están estrechamente relacionados entre sí, tales que la definición o configuración de una componente impone restricciones al resto de las componentes. La selección de las componentes y la operación para integrarla con la técnica convencional PIV es impulsado por las normas establecidas con respecto a la concentración de partículas, su tamaño y el desplazamiento estimado de las partículas en la imagen (Adrian, 1991). El uso de estas normas es una práctica común para las mediciones mediante PIV en ambientes y escalas de laboratorio; sin embargo, con la posible excepción de canales y arroyos suficientemente pequeños (Bradley et al., 2002; Jodeau et al., 2008), cuando se desea implementar la técnica LSPIV en mediciones de campo es necesario ajustar ciertos procedimientos. Esto incluye por ejemplo determinar la posición o las posiciones en las cuales se hará la grabación de las imágenes de manera que se logre mitigar dos problemas típicos que ocurren cuando se quiere hacer medición en campo. El primero corresponde al efecto generado por la luz sobre ciertas zonas del área visible de las cámaras sobre todo cuando se trabaja únicamente con luz natural, zonas de sombra o reflejos que degradan la calidad de la imagen Hauet et al. (2008b).

Un segundo problema es la insuficiencia de trazadores sobre el flujo. Una situación favorable es cuando el flujo superficial puede ser estimado a partir de trazadores naturales visibles en la imagen (por ejemplo desechos, troncos o cortezas, hojas, flores, espuma, resaltos creados en la superficie por la turbulencia, entre otros). Sin embargo, estos trazadores no siempre están disponibles o no pasan la cantidad suficiente con la frecuencia adecuada en flujos naturales, por tanto en muchos casos deben ser agregados de manera artificial a la superficie libre del cauce.

Una situación favorable es cuando la reflexión especular formada por la incidencia de la luz sobre la superficie del flujo interactúa con las irregularidades de la superficie libre, de manera que pueda ser usada como un trazador sustituto. Estas deformaciones con longitudes de onda típicas entre 2 y 4 cm, son generadas por viento o por estructuras turbulentas de gran escala que intersectan la superficie libre. Usando la variación de la intensidad de la luz asociada con las deformaciones en la superficie libre, las mediciones de campo pueden ser obtenidas exitosamente usando estos trazadores sustitutos (Creutin et al., 2002; Fujita y Hino, 2003). Cuando ninguna de las condiciones favorables ocurren, es necesario entonces el uso de trazadores artificiales. Algunos factores adversos para el flujo de los trazadores pueden ser fuertes vientos en la superficie o la agregación de partículas de trazadores inducida por electrostática partícula a partícula.

La frecuencia de captura y grabación de las imágenes es función de las condiciones de luz, de su disponibilidad y de los trazadores sobre la superficie libre. En cuanto al tamaño de la imagen ésta se decide en función de la resolución y de la capacidad para distinguir el movimiento del agua sobre pares de imágenes sucesivas. Hay también diversas situaciones en las que las imágenes son adquiridas sucesivamente en varios lugares al tiempo mediante diferentes cámaras y posteriormente ensambladas a manera de panorámica para cubrir la totalidad del área de interés.

LSPIV puede ser empleado tanto en condiciones de laboratorio como en campo, con muestreos hasta de 30 Hz, adecuado para capturar velocidades en aplicaciones hidráulicas e hidrológicas, permitiendo de esta manera un mejoramiento en la resolución espacial y temporal de los registros.

### 2.2.3 Ortorectificación de las imágenes

Las imágenes de las superficies de los ríos son usualmente tomadas desde un puente o una margen del río usando un ángulo oblicuo en relación con el plano de la superficie del río (Ver Figura 2.5a). Con el fin de obtener datos precisos del flujo en movimiento a partir de las imágenes, éstas deben ser rectificadas por un esquema de transformación de la imagen apropiado. Generalmente una relación fotogramétrica convencional se aplica para producir orto-imágenes usando coordenadas conocidas de puntos de control sobre el terreno (GCPs) en el sistema de coordenadas real ( $X, Y, Z$ ) y en el sistema de coordenadas de la imagen ( $u, v$ ), como se muestra en la Figura 2.5b. La selección de estos puntos de control depende a menudo de lo que es accesible en el campo (por ejemplo, árboles, postes de tendido eléctrico, las esquinas en las construcciones, un techo, una roca fija, etc).

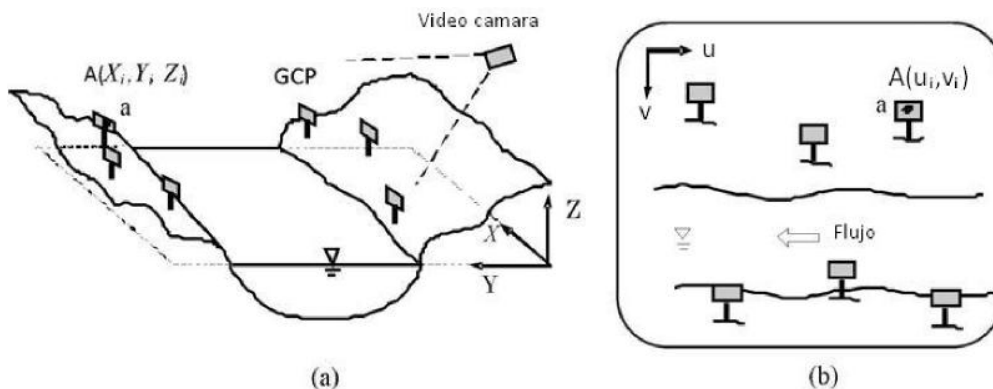


Figura 2.5 (imagen tomada de Muste 2008): Relación entre la cámara y el sistema coordenado del terreno. (a) Coordenadas reales ( $X, Y, Z$ ) y (b) coordenadas sobre la imagen ( $u, v$ )

## 2.2.4 Procesamiento de las imágenes

Los algoritmos empleados en LSPIV para estimar las velocidades son semejantes a aquellos que se usan en los métodos convencionales PIV para imágenes en alta definición (Adrian, 1991). La esencia del método consiste en aplicar un patrón de coincidencia o similitud en la distribución de intensidad de una serie de imágenes, como se ilustra en la Figura 2.6. El índice de similitud de los patrones encerrados en una pequeña área llamada “Área de Interrogación” (IA), ajustada en la primera imagen, se calcula para una ventana del mismo tamaño a lo largo de toda el área de la imagen de interés, llamada Área de búsqueda (SA) seleccionada en la segunda imagen. Entre las ventanas con el índice de similitud más alto se asume entonces el desplazamiento mas probable del flujo entre dos imágenes consecutivas. Una vez la distancia entre los centros de las pequeñas ventanas son obtenidos, la velocidad puede ser calculada dividiendo entre el tiempo de captura de las dos imágenes consecutivas ( $dt$ ). El proceso de búsqueda es aplicado sucesivamente entre todas las IA's en la imagen.

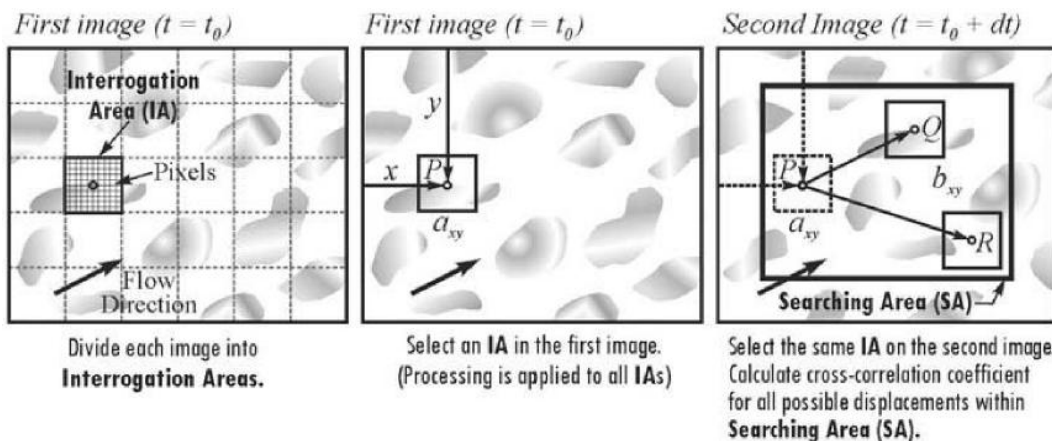


Figura 2.6 (imagen tomada de Muste 2008): Conceptualización del algoritmo LSPIV (los patrones en la imagen son formados usualmente por pequeñas partículas de la misma naturaleza, es decir, espuma, hojas, o trazadores artificiales agregados a la superficie para las mediciones).

El algoritmo para el cálculo de la velocidad sobre la imagen usa el coeficiente de correlación (cross-correlation coefficient) como índice de similitud (Fujita et al., 1998). La correlación cruzada se calcula entre un área de interrogación (IA) en la primera imagen y áreas de interrogación localizadas dentro del área de búsqueda (SA) en la segunda imagen. El par de partículas que muestran el máximo coeficiente de correlación cruzada es seleccionado como candidato a vector. En este método, el coeficiente de correlación cruzada,  $R_{ab}$ , está definido como:

$$R_{ab} = \frac{\sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} \{(a_{xy} - \bar{a}_{xy})(b_{xy} - \bar{b}_{xy})\}}{\left\{ \sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (a_{xy} - \bar{a}_{xy})^2 \sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (b_{xy} - \bar{b}_{xy})^2 \right\}^{1/2}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde  $MX$  y  $MY$  son las áreas de interrogación y  $a_{xy}$  y  $b_{xy}$  son las distribuciones de las intensidades en escala de grises (valores entre 0 y 255 para una imagen de 8-bit) de las dos áreas de interrogación separadas por un intervalo  $\Delta t$  (Ver Figura 2.3). La raya arriba indica el valor medio de la intensidad del área de interrogación.



## **2.3. Evolución de la técnica de LSPIV**

### **2.3.1. Histórico de la técnica LSPIV**

Adrian (1991) menciona que los velocímetros gráficos de partículas han mejorado sobremanera nuestra capacidad de medir los vectores instantáneos de velocidad en numerosos caudales generados en el entorno controlado de un laboratorio.

Algunos de los primeros intentos de investigar las corrientes naturales utilizando un método basado en imágenes (imagen-velocidad) fueron los de Leese et al. (1971) utilizando imágenes de satélite para realizar un seguimiento del movimiento de las nubes en la atmósfera, Collins y Emery (1988) el hielo marino, y Holland et al. (1997) para cuantificar la turbulencia del oleaje en regiones costeras.

Las primeras mediciones de Velocimetría gráfica en entornos fluviales fueron realizadas en Japón por Fujita y Komura (1994) y requerían la captura de imágenes de grandes sectores de la superficie del río, motivo por el que esta técnica se bautizó como “Large-scale particle image velocimetry” (LSPIV) o Velocimetría de imágenes de partícula a gran escala, seguido por Aya et al., (1995) y nuevamente Fujita et al., (1997), esta técnica es una modificación de la técnica PIV utilizada en laboratorios desde hace más de tres décadas.

Otra aplicación la realizó Jasek et al., (2001) utilizando la técnica de LSPIV para realizar estimaciones de descarga de río Yukon en Alaska durante un atasco de hielo, donde fueron utilizados como trazadores los bloques de hielo que eran arrastrados por la corriente sobre la superficie libre del río.

En el instituto de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Iowa (IIHR), Creutin et al., (2003) aplico un sistema de medición de caudal basado en LSPIV en el río Iowa, utilizando como trazador de flujo la espuma natural producida por un vertedor ubicado a 100 metros aguas arriba del rio, con el que se obtuvo un amplio rango de descargas de 50 a 300 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y comparo las mediciones de LSPIV con las obtenidas en una estación aforadora del Instituto Geológico de Estados Unidos instalada alrededor de 100 m del sitio de estudio, mostrando un coeficiente de correlación de 0.98 entre las dos series de valores.

Nuevamente en el IIHR de Iowa, Muste et. al. (2004a) realizaron pruebas para la Validación y ampliación de las capacidades de la velocimetría por imágenes para el diagnóstico de flujos en modelos hidráulicos, en las que se evaluó el desempeño de la técnica, el perfeccionamiento de los aspectos de ejecución, y la ampliación de sus capacidades en el estudio de flujos. Los experimentos de validación descrita en el documento fueron específicamente diseñados para evaluar la viabilidad y la exactitud de LSPIV implementada en modelos hidráulicos y se comparo con la componente de dos ADV, donde se encontró una precisión del 1% para las mediciones con LSPIV en condiciones de laboratorio. Al mismo tiempo en este artículo se presentó una nueva técnica llamada CSWIV que consiste en crear perturbaciones artificiales en la superficie libre del flujo para posteriormente ser utilizada para medir las velocidad del flujo, este enfoque ha sido desarrollado para superar una importante limitación de la LSPIV, que es la dependencia de partículas trazadoras en la superficie libre para seguir el movimiento del flujo.

Meselhe et al., (2004) realizo aplicaciones de LSPIV en flujos de baja velocidad y poca profundidad para investigar la sensibilidad de la técnica respecto a la densidad de siembra y el intervalo de tiempo entre imágenes sucesivas. Los resultados obtenidos mostraron que la técnica LSPIV es muy adecuada en flujos lentos que suelen estar por debajo del límite de detección de la mayoría de los dispositivos convencionales como los ADV y ADCP que requieren una profundidad mínima de 0.25 m.

Dermisis y Papanicolaou (2005), mencionan, la utilización de la técnica LSPIV para la medición del flujo al rededor y dentro de la vecindad de las estructuras hidráulicas. El objetivo principal de este estudio, fue evaluar el rendimiento hidráulico de una estructura de control en una caída hidráulica que facilita el libre paso de los peces.

Jodeau et al., (2008) realizó la aplicación y evaluación de la técnica de LSPIV para medir velocidades de superficie del agua en un río en condiciones de flujo alto, en la cual se desarrolló e implementó una instalación completa, incluyendo la captación de vídeo desde un mirador elevado móvil y utilizando trazadores de flujo artificiales.

Hauet et al., (2008a) estudió la sensibilidad de la Velocimetría por imágenes de partículas para mediciones en descargas de ríos utilizando simulación numérica. Encontrando una correlación entre las descargas obtenidas con LSPIV y las simulaciones de  $R^2= 0.948$  (i.e. 5% de la varianza del error), una correlación debida a la iluminación - aire de  $R^2= 0.992$  y varianza de error producto de la inclinación de  $R^2=0.825$ .

Actualmente existen un gran número de artículos y textos escritos que describen el funcionamiento de la técnica del LSPIV como una técnica emergente para medición de velocidades de flujo, tal es el caso del Boletín de la OMM 57(3) Muste, et al (2008a) donde se menciona la necesidad de nuevas técnicas emergentes para medir caudales en corrientes fluviales.

Según Muste et al., (2008b) la LSPIV es un sistema que de forma no intrusiva logra detectar campos vectoriales de velocidades de un área desde los 100 hasta los 5,000 m<sup>2</sup>, que sirven para documentar las configuraciones de las corrientes y el aforo de los cauces.

Fujita et al., (1997), mencionan que desarrollaron un algoritmo de asignación entre el plano físico y el plano de la imagen para corregir la distorsión de la imagen. El artículo presenta un procedimiento nuevo de transformación de imágenes que minimiza considerablemente los errores asociados con el ángulo de captura de la imagen.

Bieri et al., (2009) describe las aplicaciones de LSPIV en dos casos diferentes llevadas a cabo en el laboratorio de construcciones hidráulicas (LCH) en la EPFL, concretamente en el marco de un Río y un proyecto de presa en ingeniería

Fujita et al., (2007) muestra una modificación de la técnica de LSPIV donde utiliza los rasgos producidos por la turbulencia en la superficie del agua, para trazar campos de velocidades superficiales llamando a esta técnica STIV, la cual se describe posteriormente en este trabajo.

Fox y Belcher, (2011) comparo las mediciones de la LSPIV con la descomposición de datos obtenidos con la velocimetría de imágenes de partículas (PIV) y Acústico Doppler Velocimetry (ADV). Con el fin de proporcionar resultados de visualización y estimación de longitud de escala de turbulencias formadas en el flujo superficial de canales abiertos con lecho de grava.

Desde 1995 y hasta hoy el IIHR- Hydroscience & Engineering (anteriormente el Instituto de Investigaciones Hidráulicas de Iowa) y la Universidad de Kobe han aplicado con éxito la LSPIV en varios experimentos de laboratorio y de campo (Fujita et al. 1998; Muste et al. 1999; Muste et al. 2000; Xiong 2000; Li 2002; Schone 2002).

En la revisión de la literatura referente a la técnica de LSPIV y su aplicación se mencionan problemas que enfrenta la técnica, uno de los principales es la necesidad de trazadores visibles en el flujo con el fin de estimar las velocidades (Muste et al., 2004a, Creutin et al., 2003, Fujita et al., 2007) y métodos de siembra de trazadores artificiales en flujos de gran escala.

### **2.3.2. Potencial actual de la técnica LSPIV**

Muste (2004) menciona que los resultados de las pruebas experimentales demuestran que la velocimetría de imagen posee grandes capacidades para investigaciones hidráulicas de laboratorio y tiene el potencial de ser aplicado con éxito en importantes ríos y en la ingeniería costera.

La LSPIV que se describe en más de 30 artículos, podría proporcionar un ambiente seguro para la obtención de velocidades en corrientes fluviales, según Muste et al., (2008b), pero para poner en operación esta técnica intervienen infinidad de condiciones, como son calibración, adaptación y diseño del sistema.

Hauet et al., (2008b), describe un sistema experimental para realizar mediciones continuas de descarga en el río Iowa en tiempo real, basado en imágenes y tecnologías no intrusivas. En su artículo menciona algunas necesidades importantes para ser investigadas en lo referente a la aplicación de la técnica de LSPIV, destacando problemas de iluminación, refracción de luz sobre la superficie del río, interacción del viento sobre los trazadores, y la necesidad de conocer la batimetría de la sección y mediciones simultáneas del nivel del agua en el río en estudio para realizar el cálculo de descargas.

## 3. Marco Teórico

### 3.1 Visualización del flujo

Para la operación de la técnica LSPIV se requiere visualizar grandes áreas del flujo (rio, canal u obra hidráulica) que posteriormente será analizada, siendo necesario grabar las imágenes desde un punto superior ya sea perpendicular o inclinado al plano del flujo, para ello puede ser utilizado un puente, torre, mástil u alguna otra estructura donde montar la cámara de video para capturar las imágenes (figura 3.1). Recordando que las mediciones del flujo son indirectas, es necesario contar con trazadores, que seguirán la trayectoria superficial del flujo, para que al momento de procesar las imágenes arrojen como resultados campos de velocidades. Los trazadores utilizados para la técnica de LSPIV pueden ser naturales al flujo (bloques de hielo, manchas, hojas secas, refracción de luz, etc.) o artificiales.



Figura 3.1. En la imagen izquierda se puede observar un mástil donde se monto la cámara de video y del lado derecho se utiliza una torre.

### 3.2 Captura de imágenes.

Para analizar las velocidades superficiales de flujo a través de la técnica de LSPIV es necesario introducir pares de imágenes con un diferencial de tiempo entre sí al programa de Mat\_LSPIV, estas imágenes son grabadas a través de una cámara de video de alta definición. La cámara utilizada para este proyecto es una cámara SONY HDR-CX110 (Figura 3.2) de resolución 1920 x1080 que permite grabar imágenes en calidad Sony® Full High, cuenta con un lente Carl Zeiss® Vario Tessar que utiliza óptica extremadamente avanzada para proveer una imagen nítida y brillante, saturación de color natural y reproducciones perfectas de incluso los tonos sutiles y velocidades de 60 a 240 fotos por segundo.



Figura 3.2. Videocámara SONY HDR-CX110.

### **3.3 Procesamiento de imágenes**

La técnica de LSPIV convencional consta de 4 aplicaciones principales: visualización del flujo, iluminación, captura de imágenes y procesamiento de imágenes, el cual se realizara utilizando el programa Mat\_LSPIV elaborado por Alexandre Hauet de la Universidad de Iowa en el 2007, utilizando programación en Matlab. El procedimiento del LSPIV presenta tres pasos principales:

1. Orthorectification (ortorectificación);
2. PIV Analysis (Análisis del PIV);
3. Post Processing (post-procesamiento).

#### **3.3.1 Ortorectificación**

La ortorectificación es el método de corrección del efecto de perspectiva de las imágenes, Mat\_LSPIV usa una calibración implícita en el método para transformar las imágenes capturadas en imágenes corregidas. La ventana de Ortorectificación presenta tres pasos principales para el proceso de ortorectificación de las imágenes:

1. GRPs Localisation (Localización de los GRP);
2. Transformation Parameterization (transformación de parametrización);
3. Transform all the images (Transformar Todas las imágenes)



## (1) GRP's Localización

GRP significa puntos de referencia en tierra, que son los puntos de coordenadas conocidas tanto en el sistema de coordenadas de la imagen (en píxeles) y el sistema de coordenadas del espacio (en unidades cartesianas, como metros o pies). Puede ingresarse los GPRS de forma manual o la introducirlos por un archivo que contiene las ubicaciones de GRPS. Las unidades cartesianas de la computación dependen de las unidades de los GRPs, si GRPs de entrada son en metros, entonces todas las salidas del software será en metros, si GRPs de entrada son en pies, entonces todas las salidas del software estará dada en pies. Una vez que los GPRs se introducen, el software resuelve una matriz de 8 parámetros del plano real al plano de proyección, usando el método de mínimos cuadrados.

$$X = \frac{a_1 i + a_2 j + a_3}{a_7 i + a_8 j + 1} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$Y = \frac{a_4 i + a_5 j + a_6}{a_7 i + a_8 j + 1} \quad \text{Ec. (6)}$$

## (2) Transformación de parametrización

El objetivo de este paso es definir el tamaño y la resolución de las imágenes de ortorectificación. La resolución es el tamaño del espacio cubierto por un píxel. Por ejemplo, si la unidad cartesiano utilizado es el metro, una resolución de 0,01 significa que un píxel cubre un tamaño físico de  $1 * 1 \text{ cm}^2$ . Entre más pequeño sea el numero, mayor será la resolución y el detalle de la orto-imagen, y el tiempo de computo se irá incrementando. No sirve de nada poner una resolución muy buena, si el estudio no lo requiere.

(3) Transformar todas las imágenes

Durante este paso, todas las imágenes seleccionadas se ortorectificarán utilizando el coeficiente calculado en el paso 1-GRP localización y los parámetros establecidos en el paso 2- Transformación de parametrización. Este paso es el último de los procedimientos de ortorectificación. El análisis de PIV es el siguiente paso

### 3.3.2 Análisis de PIV

(1) PIV Parametrización

El algoritmo del PIV calcula la correlación entre el área de interrogación (IA) centrada en un punto  $a_{ij}$  de la primera imagen y la IA centrada en un punto  $b_{ij}$  de la segunda imagen tomada en un intervalo de tiempo  $\delta t$  en segundos. El tamaño de la IA define la resolución espacial de la medición y debe ser lo suficiente mente pequeño para conservar la escala de interés en el flujo, escalas más pequeñas en el tamaño de la IA se perderan en el procesamiento. Sin embargo, tiene que ser lo suficientemente grande como para incluir a trazadores reconocibles dentro de ella, es decir, para abarcar uno o más trazadores que se utilizan para definir el flujo de la superficie libre

El coeficiente de correlación  $R(a_{ij}, b_{ij})$  es un índice de similitud de la intensidad en escala de grises de un grupo de píxeles contenidos en la comparación de dos IAs, expresa como:

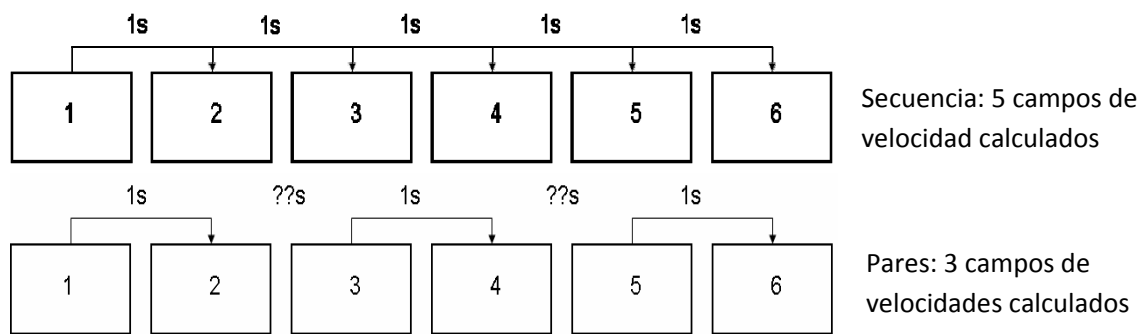
$$R_{ab} = \frac{\sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} \{(a_{xy} - \bar{a}_{xy})(b_{xy} - \bar{b}_{xy})\}}{\left\{ \sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (a_{xy} - \bar{a}_{xy})^2 \sum_{x=1}^{MX} \sum_{y=1}^{MY} (b_{xy} - \bar{b}_{xy})^2 \right\}^{1/2}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde  $M_x$  y  $M_y$  son los tamaños de las áreas de interrogatorio (en píxeles), y  $a_{ij}$  y  $b_{ij}$  son las distribuciones de las intensidades de niveles de gris en las dos áreas de interrogación. Los coeficientes de correlación calculados son sólo para los puntos dentro de un área de búsqueda (SA). El tamaño de SA tiene que ser seleccionado de manera que el desplazamiento de los trazadores de la primera imagen estén contenidos dentro de la SA de la segunda imagen. En consecuencia, el tamaño de SA es acorde con el rango esperado de las velocidades del río. Para los ríos con pequeñas velocidades en corrientes cruzadas, la SA debe ser asimétrica, alargada en la dirección del flujo. El enfoque del piv asume el desplazamiento más probable del fluido desde el punto  $a_{ij}$  durante un intervalo de tiempo  $\delta t$  entre dos imágenes, es el correspondiente al coeficiente de correlación máxima. Se puede llegar a la precisión del desplazamiento de un pixel usando un ajuste parabólico. Los vectores de velocidad se derivan de estos desplazamientos dividiéndolos por  $\delta t$ .

La forma del IA es un cuadrado. su tamaño debe ser un número par y la SA se define por 4 cuerpos:  $S_{im}$ ,  $S_{ip}$ ,  $S_{jm}$ ,  $S_{jp}$ , donde  $i$  y  $j$  son los 2 ejes de la imagen y  $m$  y  $p$  se encuentra por negativo y positivo.  $S_{im}$  es la longitud de la SA desde el centro de la IA siguiendo el eje  $i$  en la dirección negativa.

Editar la zona de correlación mínima permite introducir un umbral para el valor mínimo del coeficiente de correlación que se utiliza. si el R máximo es inferior a ese umbral, el vector es considerado como espurio.

- Malla computacional - La malla computacional define los puntos en el sistema de coordenadas de la imagen, donde las IAs (Áreas de interrogación) y las SAs (Áreas de búsqueda) se concentran.
- Procesamiento de todas las imágenes con PIV - El programa puede procesar las imágenes de dos formas distintas, si las imágenes fueron registradas como una secuencia o en parejas. La siguiente figura ilustra la diferencia:



El software analiza cada par de imágenes con un algoritmo de PIV. Un campo de velocidad contiene 5 columnas: X, Y, U, V, R2, es decir, las coordenadas en el espacio (X,Y) a partir de las velocidades, las componentes de las velocidades en las direcciones de X y Y (U,V) y el coeficiente de correlación asociada a la velocidad (R2). Una línea en U, V y R con valor de 0 no significa que la velocidad en ese punto es 0, pero significa que las velocidades no se calculan para ese momento.

### 3.3.3 Post-procesamiento

#### (1) Verificación de la calidad y promediado

Durante este paso, se puede introducir un filtro en la magnitud de la velocidad. Un umbral en el mínimo y el máximo de la intensidad de la velocidad se pueden introducir utilizando la interfaz gráfica de usuario, y se muestra el campo de velocidades promedio filtrado. El campo de velocidades promedio contiene 6 columnas: X, Y, U, V, SDU, SDV, donde SDU representa la desviación estándar de U y SDV la desviación estándar de V.

## (2) Obtención del valor de la velocidad

Este paso permite visualizar las velocidades derivadas tales como el campo de velocidades promedio, el mapa de contornos de intensidad de las velocidades, las líneas de corriente, el campo de vorticidad o velocidades a lo largo de una sección transversal.

La vorticidad se calcula como  $(dv/dx-du/dy)$ . Para la extracción de las velocidades a lo largo de una sección transversal, se introducen los puntos inicial y final de una sección transversal. Las velocidades son interpoladas por 11 puntos distribuidos a lo largo del segmento.

### 3.4 Verificación del programa MAT\_LSPIV

#### 3.4.1 Verificación de Ortorectificación.

La verificación de la ortorectificación que realiza el programa se hizo videograbando imágenes de una cuadrícula con trazadores en ángulos que van desde los 90 a los 60° respecto al plano del flujo, posteriormente se rectificó la imagen.



Figura 3.3. Videograbación de imágenes a un ángulo de 60°

Una vez identificado los puntos de referencia, se procesaron las imágenes para ortorectificarlas y el resultado se muestra en la figura 3.4

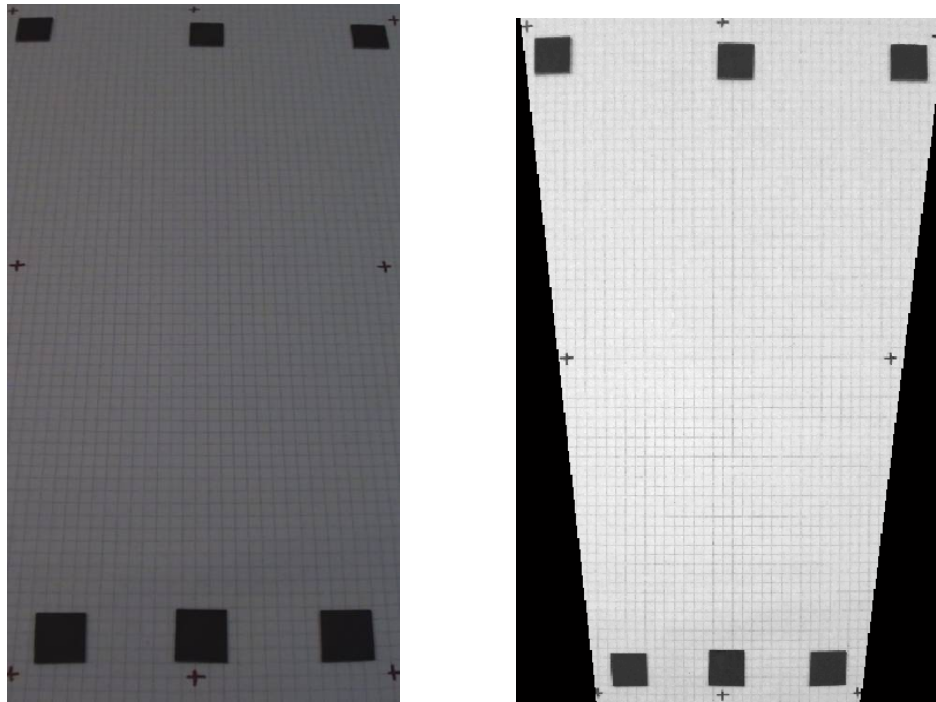


Figura 3.4 La imagen de la izquierda es sin ortorectificación y la derecha es la imagen ya corregida.

### 3.4.2 Verificación del procesamiento de PIV.

Para validar el programa se fabricaron 2 imágenes en Autocad (Fig. 3.5), donde se simuló un perfil hipotético de un río con círculos como trazadores, desplazando los trazadores simulando un perfil ideal de velocidades entre las dos imágenes. Las imágenes fueron creadas simulando una imagen plana normal al flujo, y se utilizaron ocho puntos de referencia para la ortorectificación que hace el programa, así como para la calibración de metros a píxeles.

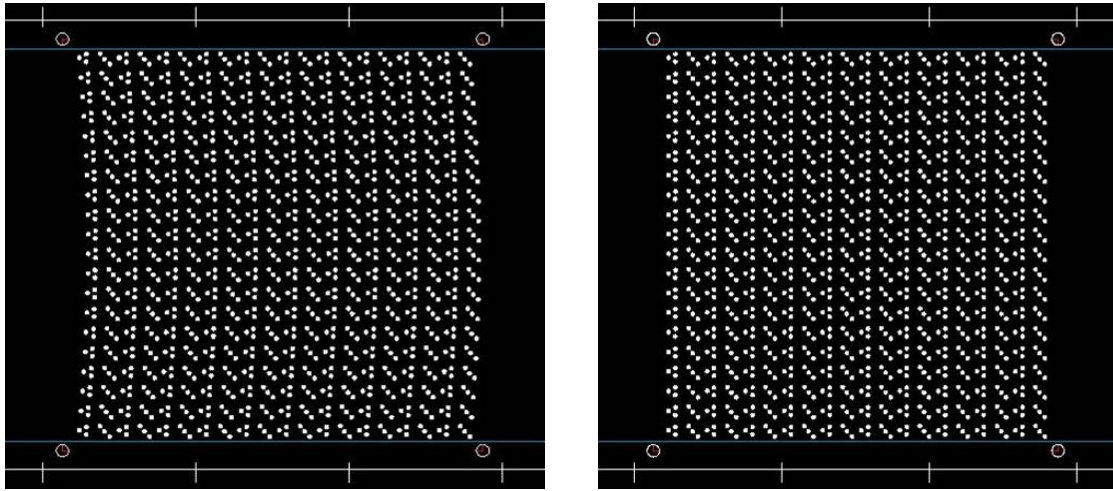


Figura 3.5 Imágenes creadas en autocad para simular un flujo hipotético

Los resultados obtenidos luego de ser procesadas las imágenes con el programa de Mat\_LSPIV fueron los siguientes.

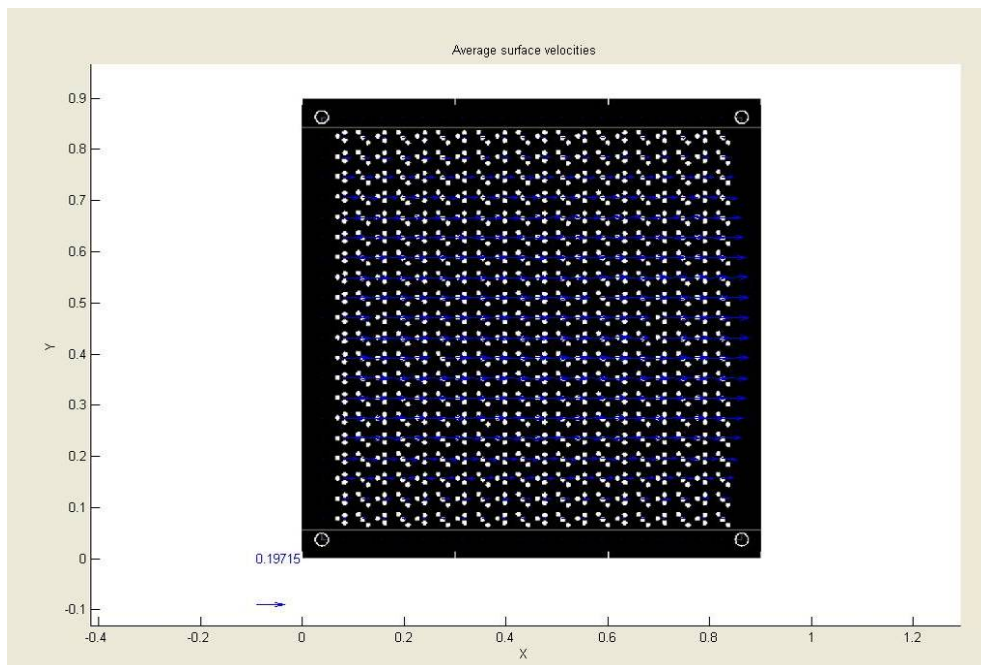


Figura 3.6 Vectores de velocidad.

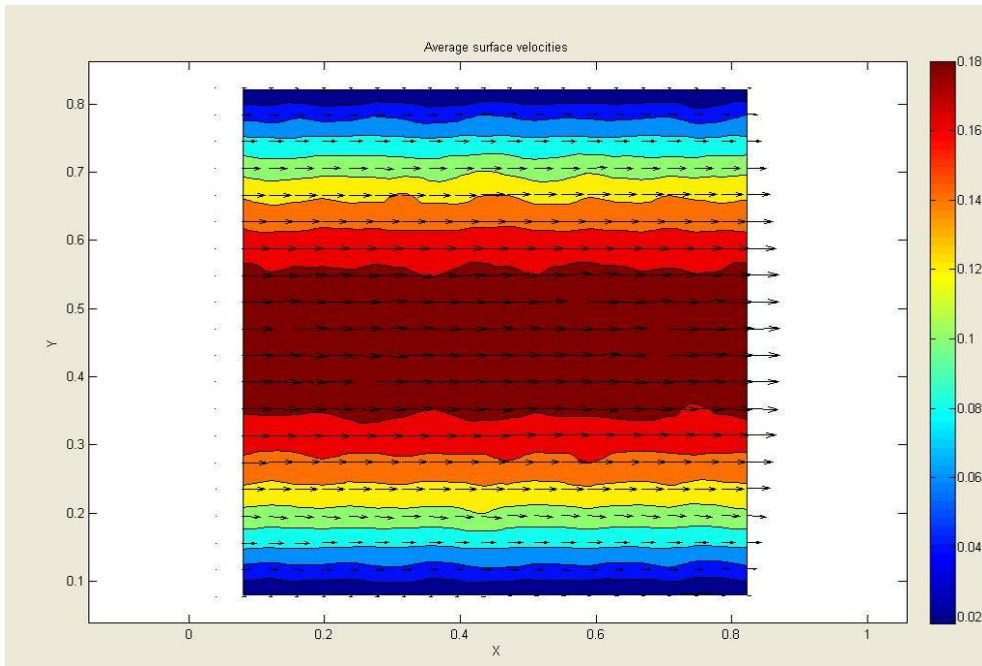


Figura 3.7 Mapa de velocidades.

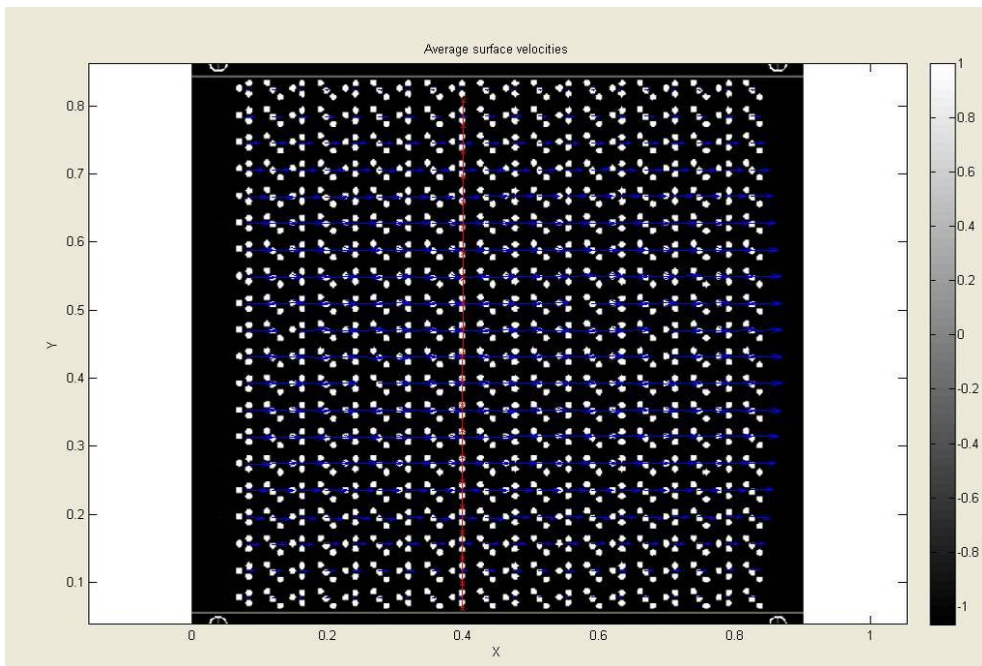


Figura 3.8 Perfil de velocidades



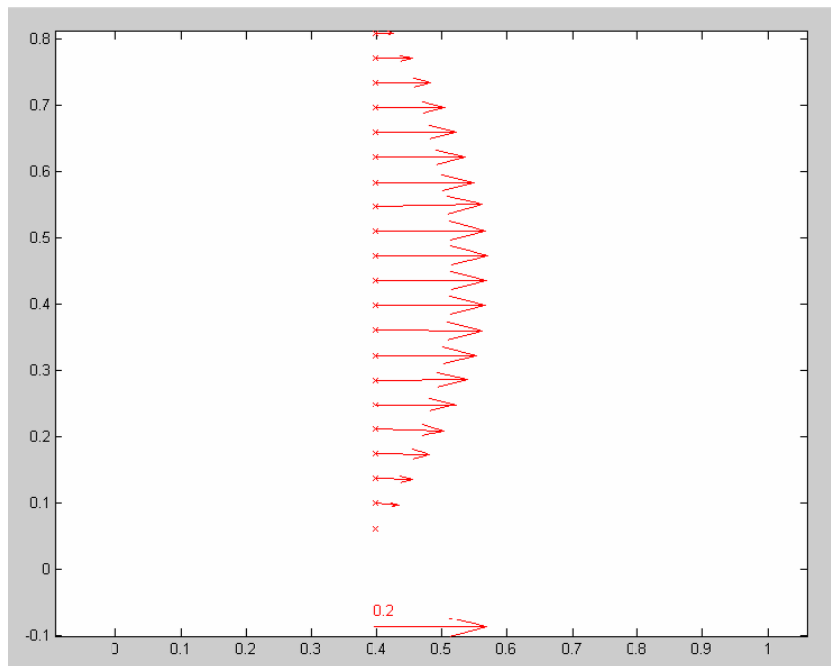


Figura 3.9 Vectores interpolados del perfil de velocidades

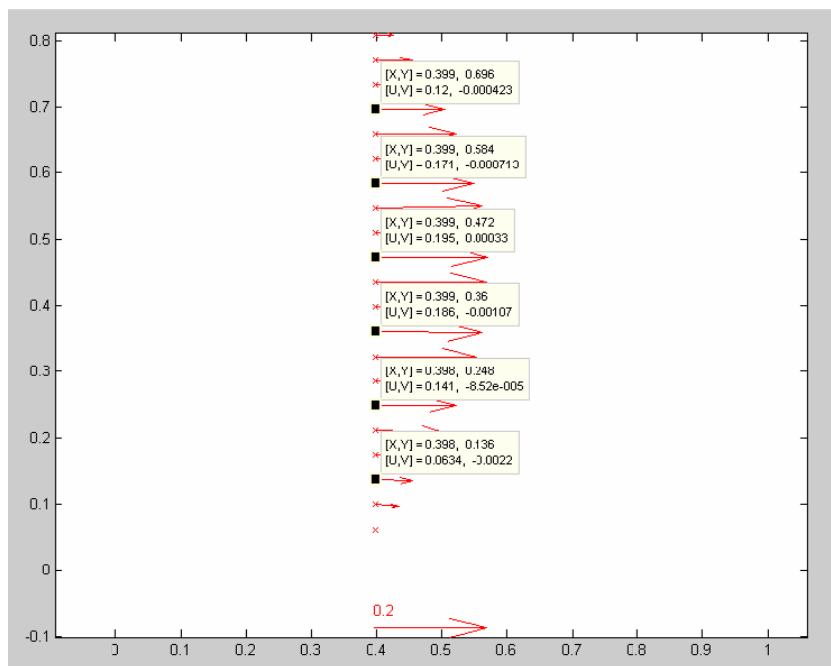


Figura 3.10 Vectores interpolados del perfil de velocidades con etiquetas.

## 4. Materiales y métodos

### 4.1 Pruebas preliminares

Con base en la revisión bibliográfica sobre la técnica de LSPIV y con el fin de evaluar la técnica para ser operada en canales, se utilizarán dos canales de un modelo reducido del laboratorio del IMTA. El modelo utilizado es la presa “Valdero de Camotlán” (Imagen 4.1) con escala 1:50, en el que se realizarán pruebas de LSPIV en los canales de descarga y aforo, el objetivo es evaluar varios métodos de siembra de trazadores de flujo y el funcionamiento de LSPIV cuando la luz incide sobre la superficie del flujo, simulando trazadores.



Figura 4.1 Modelo de la presa “Valdero de Camotlán”.

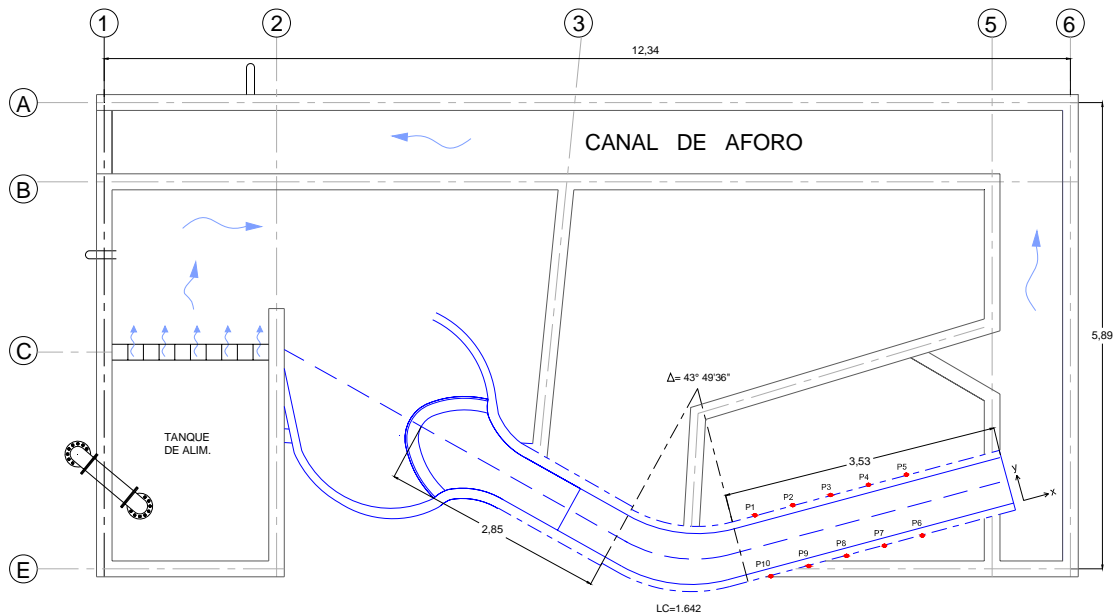


Figura 4.2 Modelo de la presa “Valdero de Camotlán”.

Uno de los canales que presenta el modelo es el de descarga de un vertedor en forma de abanico; la forma de la sección del canal es trapecial y está construido en acrílico, con una curva de radio de  $43.32^\circ$ , longitud 1.642 m y 2.85 m al centro de la cortina; posterior a la curva el canal mantiene un tramo recto de 3.53 m de longitud hasta descargar libremente. En este modelo se probará la luz incidente sobre la superficie del flujo.

El canal trapecial construido en acrílico transparente, tiene una base de 0.60 m, taludes de 0.50, pendiente de 0.001 y 0.27 m. de altura (Imagen 4.2). Para evitar la transparencia del fondo, lo cual es una limitante en la aplicación de la LSPIV, se colocará papel adhesivo en la base y taludes del canal, uniformizando el color en la zona de interrogación (Imagen 4.3).

Sobre los taludes del canal serán colocadas 8 marcas a la misma altura conociendo sus coordenadas (x,y) que serán utilizadas para la orto-rectificación de las imágenes.

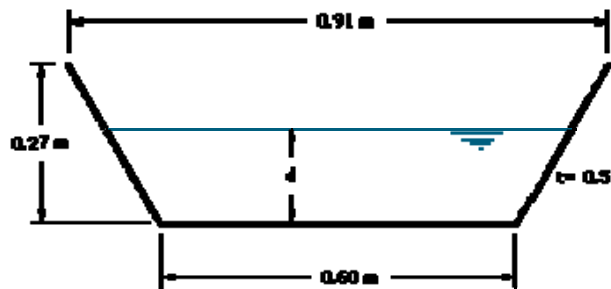


Figura 4.3 Sección transversal del canal de descarga”.



Figura 4.4 Zona recubierta con papel adhesivo.

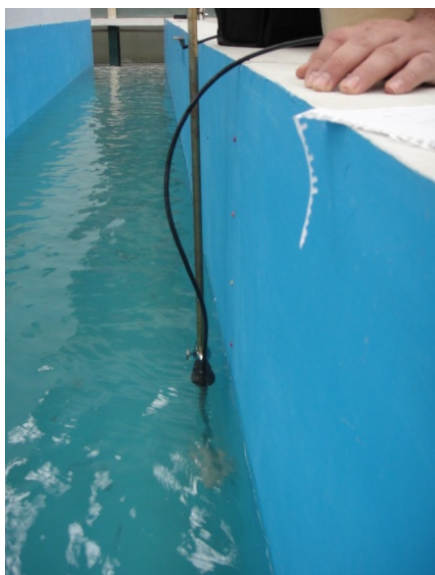
El segundo canal utilizado es el de aforo (figura 4.4.), construido de concreto de sección rectangular con una altura de 0.90 m, un ancho de 0.75 m y un largo de 12.34 m, donde se realizaran pruebas de sembrado de partículas para la LSPIV, el objetivo es evaluar varias técnicas de sembrado puntuales de partículas.

En los dos modelos para la captura de imágenes necesarias para la obtención de velocidades de referencia se empleará una videocámara SONY HDR-CX110 HD. Las secuencias de imágenes obtenidas serán analizadas posteriormente con el programa Mat\_LSPIV 2007.



Figura 4.5 Canal de aforo.

Para tener velocidades de referencia necesarios para evaluar la técnica de LSPIV se realizaran mediciones de la velocidad del flujo superficial con un medidor Flow-Mate (figura 4.5a), colocado a 3 cm debajo de la superficie del agua y se obtendrá el gasto con un vertedor calibrado de pared delgada (Figura 4.5b).



a)



b)

Figura 4.6 a) Velocímetro Flow-Mate; b) Vertedor calibrado

#### 4.1.1. Arreglo experimental para mediciones con siembra de trazadores

Debido a que la técnica LSPIV requiere trazadores visibles en el flujo a fin de estimar las velocidades, es necesario contar con una técnica para la siembra de trazadores artificiales. Muste (2004a) menciona que el procedimiento de siembra está relacionado con la aplicación de LSPIV a grandes modelos de laboratorio, y es más importante cuando se trabaja en campo, donde debido a la gran superficie medida a la vez, es beneficioso liberar el material de siembra localmente en pequeñas áreas de la corriente y en pequeñas concentraciones.

Con este experimento se pretende evaluar 2 alternativas de siembra puntuales, una al centro del flujo y otra sembrando en la margen del flujo. Los trazadores utilizados en estas pruebas serán círculos de papel y bio-bolas.

Alternativa 1a: Siembra puntual de trazadores al centro de canal (figura 4.6) a diferentes distancias respecto a la zona de análisis por LSPIV.

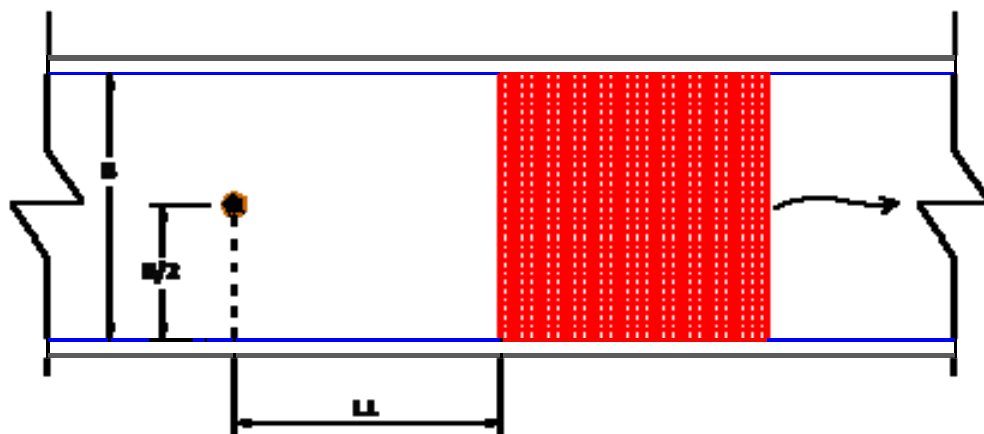


Figura 4.6. Sembrado al centro del flujo

Alternativa 4a: Siembra de trazadores sobre la margen derecha e izquierda del canal (figura 4.7), alternando las márgenes y combinadas las dos al mismo tiempo a diferentes distancias respecto a la zona de análisis por LSPIV.

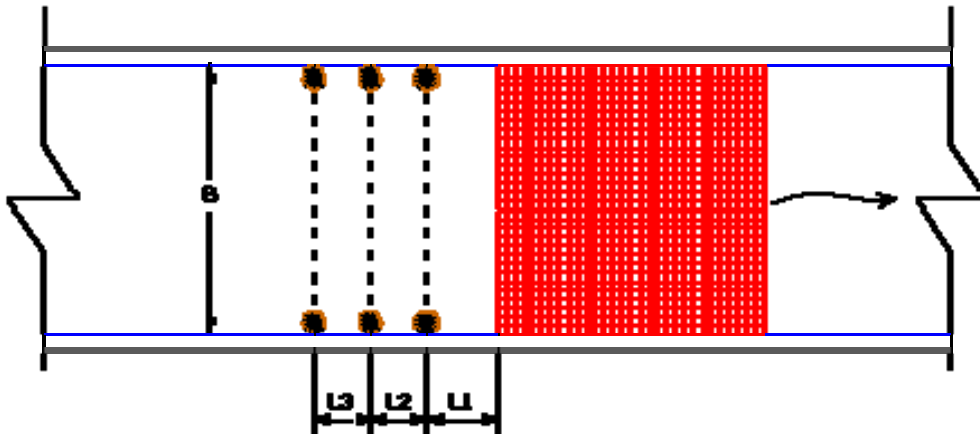


Figura 4.7. Sembrado sobre la margen del flujo

#### **4.1.2. Arreglo experimental para aplicación utilizando la incidencia de la luz como trazador natural**

Como se menciona en la literatura (Fujita et al., 1998) no siempre se dispone de trazadores naturales de flujos y la aplicación de trazadores artificiales en ocasiones no es viable, lo que constituye una limitante en la aplicación de LSPIV. Dos técnicas se describen en la literatura, una de ellas la STIV empleada por Fujita (2007) y la otra CSWIV por Muste (2008a); ambas técnicas consisten en medir las velocidades superficiales del flujo sin trazadores. Con este experimento se pretende evaluar 2 alternativas en las que se utilizará la refracción de la luz incidente sobre la superficie del agua como trazador. Para esta práctica se utilizará un inclinómetro para medir los ángulos entre la cámara y el flujo superficial, así como lámparas para iluminar el flujo.

Alternativa 1b:

En esta alternativa se instalará la cámara de manera perpendicular al eje del río y luego se reubicará de tal manera que se tengan ángulos de  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  y  $80^\circ$  respecto al plano del flujo, iluminando la superficie del agua con lámparas a un ángulo de  $45^\circ$ ,  $50^\circ$  y  $60^\circ$  respecto al plano del flujo (figura 4.8).

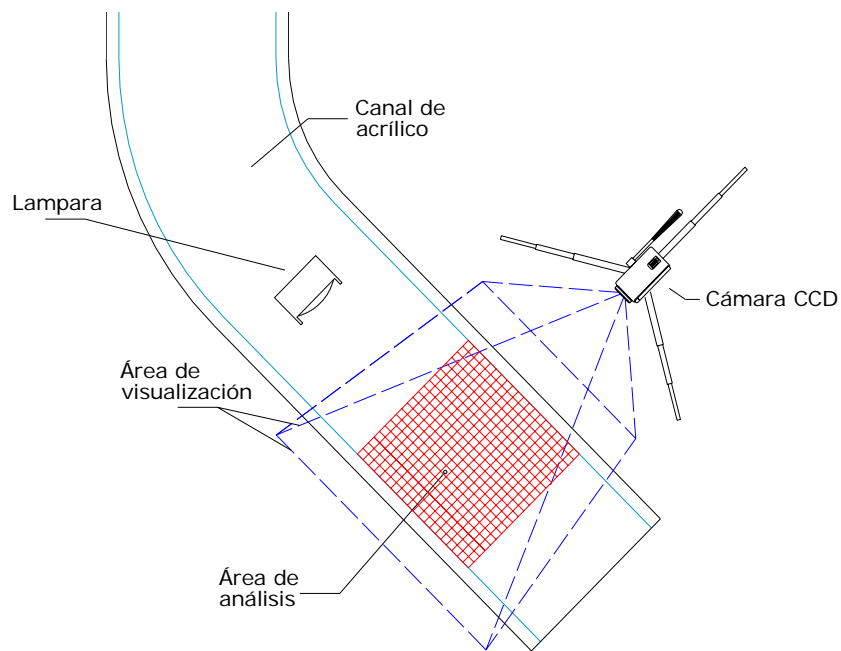


Figura 4.8. Arreglo para medición utilizando luz incidente sobre la superficie libre



## **4.2. Pruebas en condiciones de flujo uniforme**

### **4.2.1. Pruebas con sembrado y trazadores**

Para probar la siembra puntual y general, así como 5 diferentes tipos de trazadores, se realizaron pruebas con tres gastos y velocidades diferentes (bajo, medio y alto). Para las mediciones de gasto se utilizara un vertedor calibrado y como referencia de velocidades superficiales un velocímetro Flow-mate.

#### **Trazadores:**

1. Poliestireno de 3 cm
2. Bio-bolas
3. Esferas de fécula de maíz (Ecofoam)
4. Confeti de papel
5. Esferas de poliestireno de 5 mm

#### **Siembra puntual:**

A la orilla (0.05 m), a 1/5 del ancho del canal (0.15 m) en ambos márgenes y al centro del canal (0.375 m). La siembra será por trazadores unitarios y en conjunto

#### **Siembra general:**

Concentración baja, media y alta.

**Prueba 1:** Siembra puntual y general con 5 trazadores diferentes con gasto bajo.

**Prueba 2:** Siembra puntual y general con 5 trazadores diferentes con gasto medio.

**Prueba 3:** Siembra puntual y general con 5 trazadores diferentes con gasto alto.



Figura 4.9 Siembra con poliestireno extendido.



Figura 4.10 Siembra con confeti.



Figura 4.11 Siembra con poliestireno 3 cm.



Figura 4.12 Siembra con bio-bolas.

#### 4.2.2. Pruebas de LSPIV sin trazadores

Para probar la técnica de LSPIV sin trazadores artificiales, haciendo uso de la turbulencia en la superficie del flujo y vórtices emergentes como trazadores, se realizaron pruebas con tres gastos y velocidades diferentes (bajo, medio y alto) en el canal de aforo que presenta una turbulencia baja y en el canal de descarga que muestra una fuerte turbulencia. Para las mediciones de gasto se utilizara un vertedor calibrado y como referencia de velocidades superficiales un velocímetro Flow-mate.

**Prueba 4:** Prueba sin trazadores con gasto bajo, medio y alto en canal de aforo.

**Prueba 5:** Prueba sin trazadores con gasto bajo, medio y alto en canal de descarga.



Figura 4.13 Imagen extraída del video para ser procesada con Mat\_LSPIV

### **4.3. Pruebas en condiciones de flujo más complejo**

#### **4.3.1. Pruebas de LSPIV en vertedores**

Para probar la técnica de LSPIV en flujo supercríticos donde las velocidades del flujo quedan fuera del rango de los velocímetros tradicionales, se realizaron pruebas en 2 vertedores utilizando como trazador confeti de papel y operando con tres gastos y velocidades diferentes (bajo, medio y alto). Para las mediciones de gasto se utilizara un vertedor calibrado y como referencia de velocidades superficiales un velocímetro Flow-mate.

**Prueba 6:** Prueba de LSPIV en vertedor 1 con gasto bajo, medio y alto.

**Prueba 7:** Prueba de LSPIV en vertedor 2 con gasto bajo, medio y alto.

#### **4.3.2. Pruebas de LSPIV en modelos de presas**

Para probar la técnica de LSPIV en un modelo de presa en laboratorio, se realizaron pruebas en el modelo veladero de Camotlán, utilizando como trazador confeti de papel y operando con tres gastos y velocidades diferentes (bajo, medio y alto). Para las mediciones de gasto se utilizara un vertedor calibrado y como referencia de velocidades superficiales un velocímetro Flow-mate.

**Prueba 8:** Prueba de LSPIV en modelo de presa con gasto bajo, medio y alto.

### **4.3.3. Prueba de LSPIV en el canal largo del IMTALAB**

Para mostrar los efectos de borde (tipo ondas diamante) producidos en el canal largo de IMTALAB, se aplicara la técnica de LSPIV utilizando como trazador confeti de papel y operando con tres gastos y velocidades diferentes (bajo, medio y alto). Para las mediciones de gasto se utilizara un aforador ultrasónico y como referencia de velocidades superficiales un velocímetro Flow-mate.

**Prueba 9:** Aplicación de LSPIV en canal largo de IMTALAB con gasto bajo, medio y alto.

# 5. Resultados

## 5.1 Resultados en canales con flujo uniforme

Segundas mediciones de laboratorio se realizaron en el canal de aforo para evaluar la técnica de sembrado de partículas y el efecto de los reflejos en la superficie del flujo, colocando la cámara sobre el eje del flujo a 30° de la horizontal, se grabó 1 minuto de video a una velocidad de 30 fotos por segundo y luego fue procesada 15 imágenes (Ver figura 4.14) con el programa de Mat\_LSPIV.

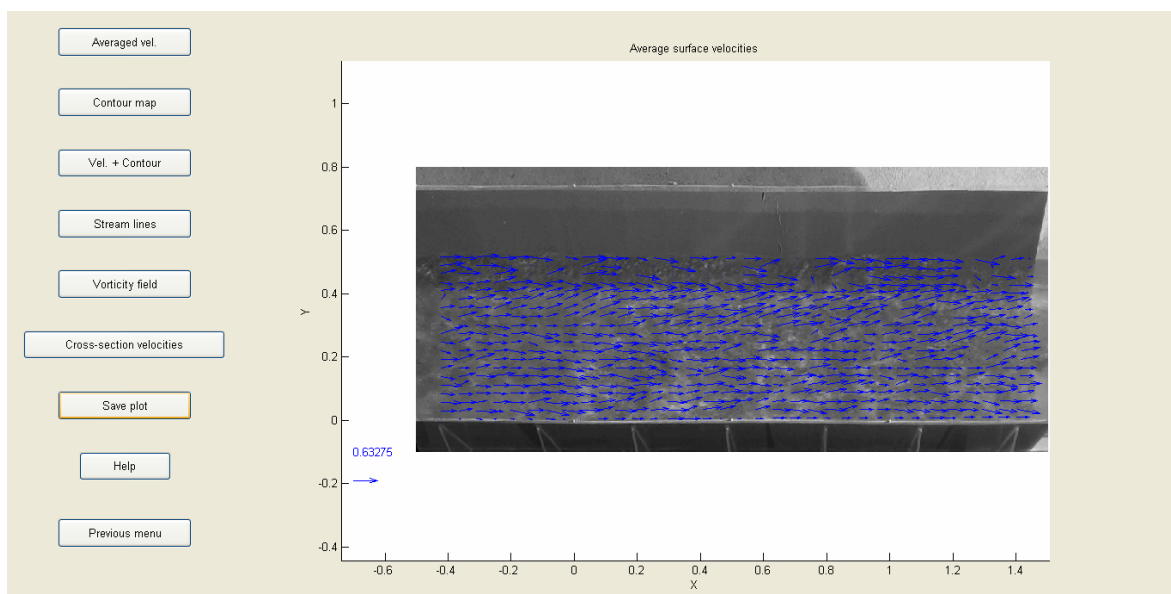


Figura 4.10. Vectores de velocidad obtenidos con Mat\_LSPIV

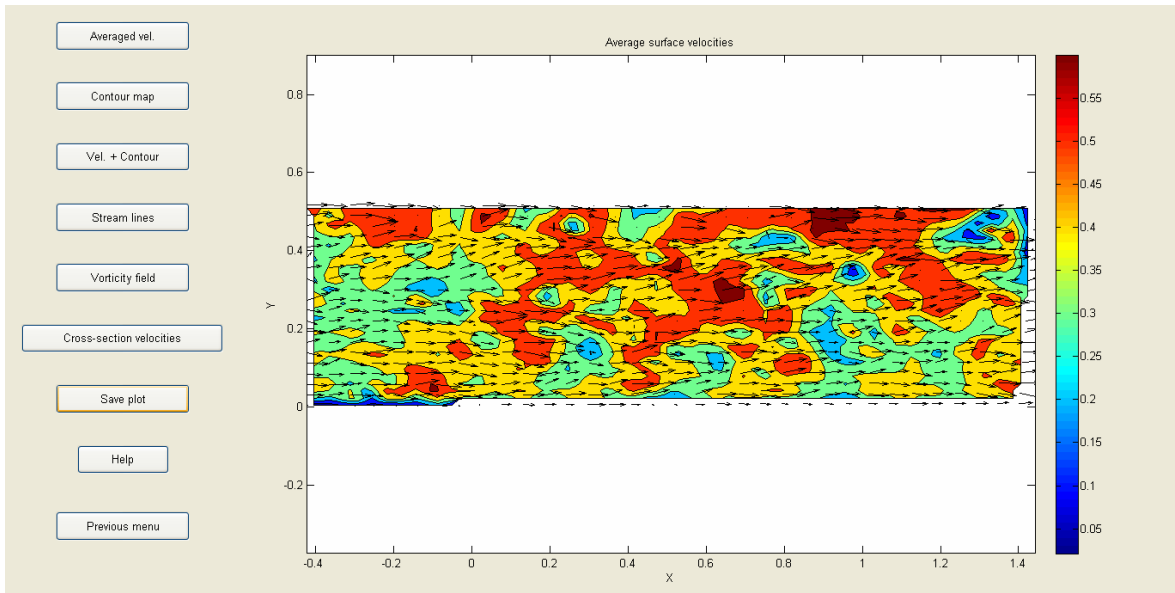


Figura 4.11. Campo de velocidad obtenidos con Mat\_LSPIV

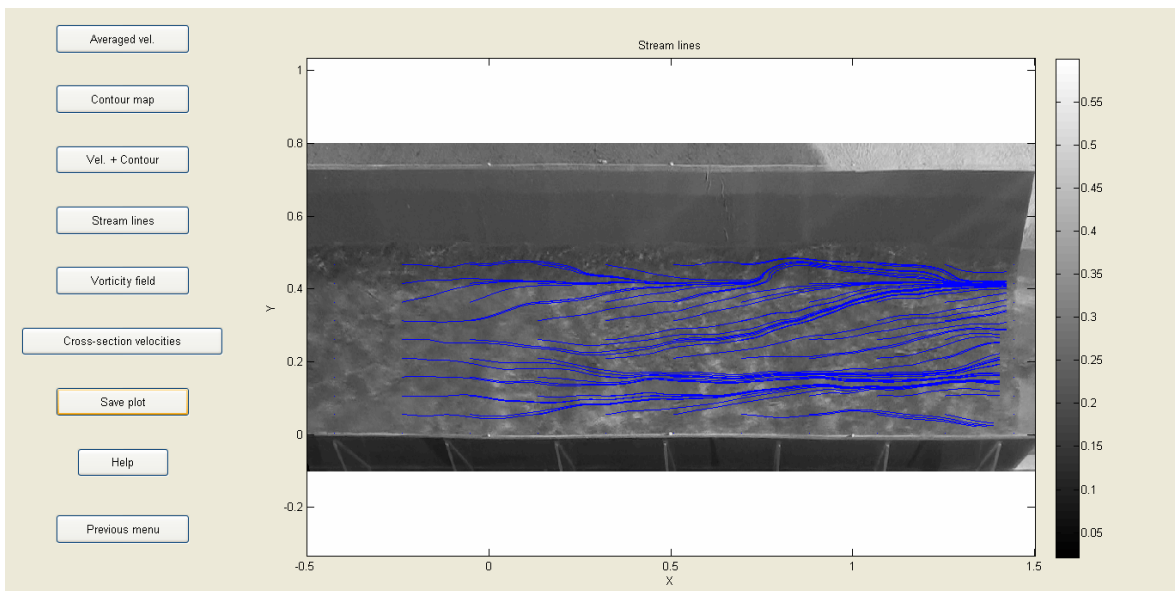


Figura 4.11. Líneas de flujo obtenidos con Mat\_LSPIV



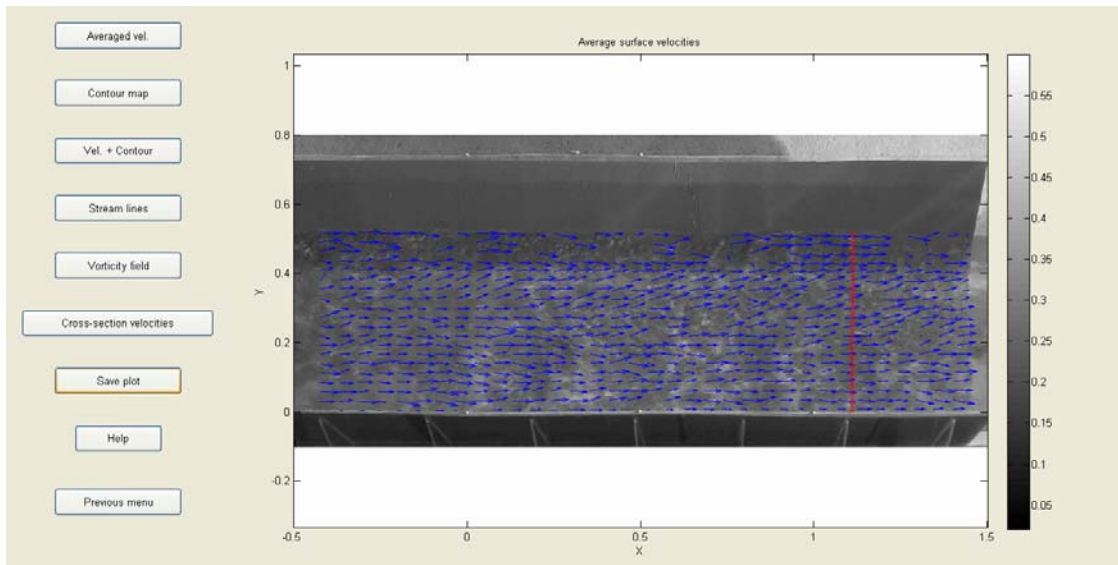


Figura 4.12. Perfil transversal de velocidades obtenido con Mat\_LSPIV

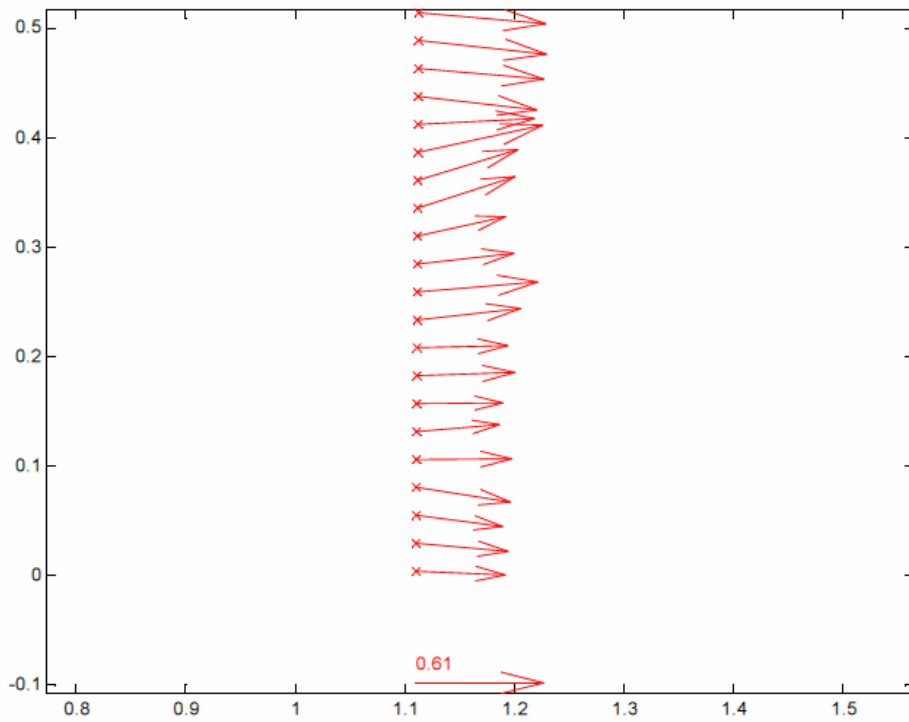


Figura 4.13. Vectores del perfil transversal de velocidades obtenidos con Mat\_LSPIV



Figura 4.14. Imagen extraída del video para ser procesada con Mat\_LSPIV

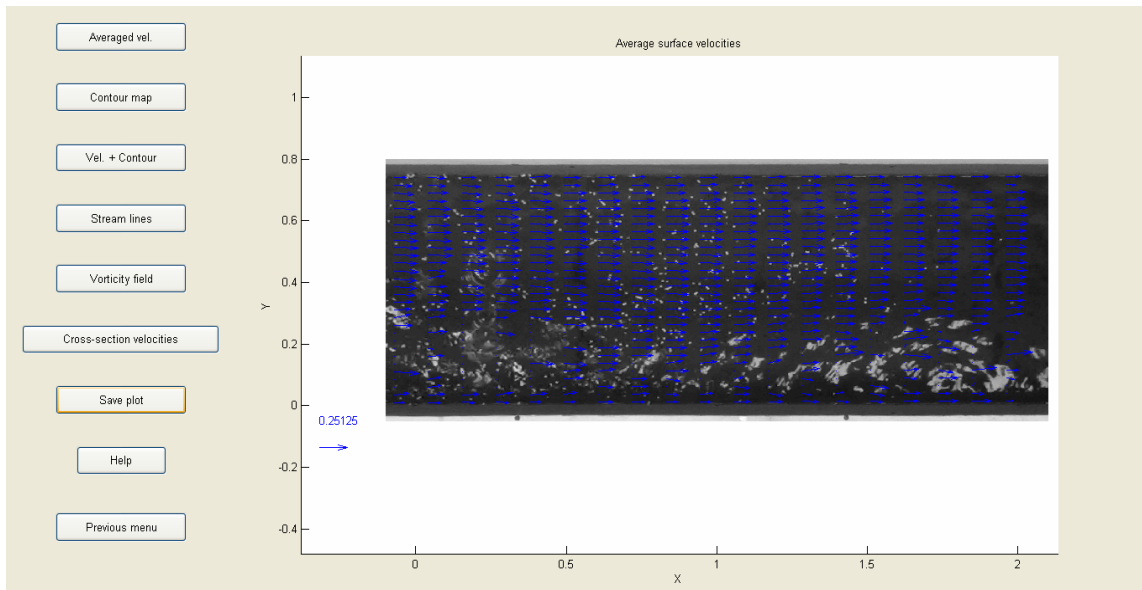


Figura 4.15. Vectores de velocidad obtenidos con Mat\_LSPIV

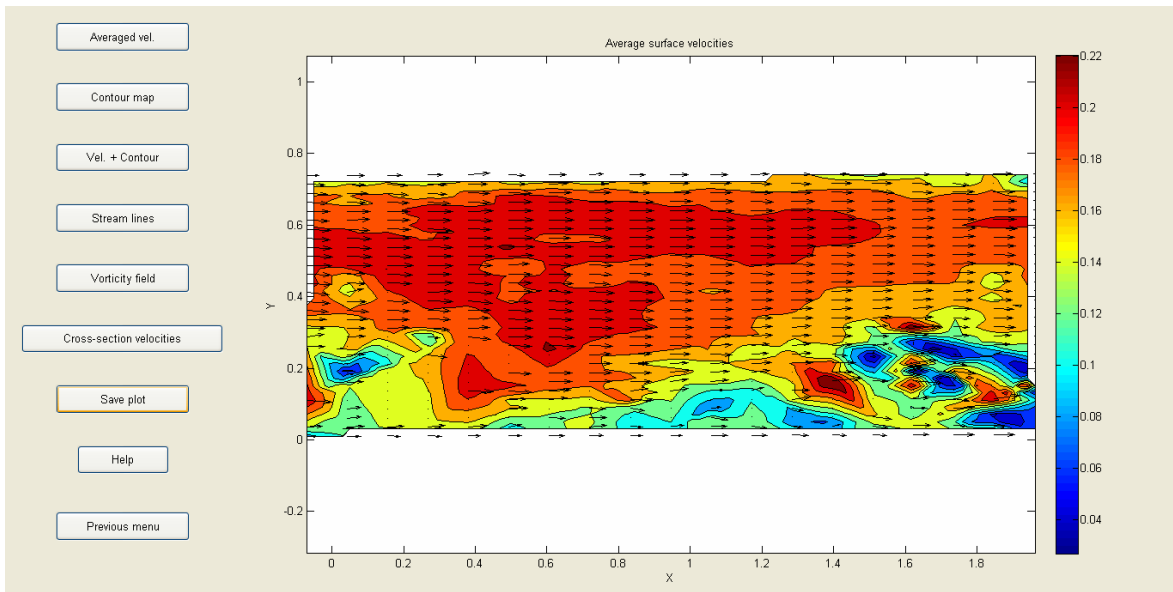


Figura 4.16. Campo de velocidad obtenidos con Mat\_LSPIV

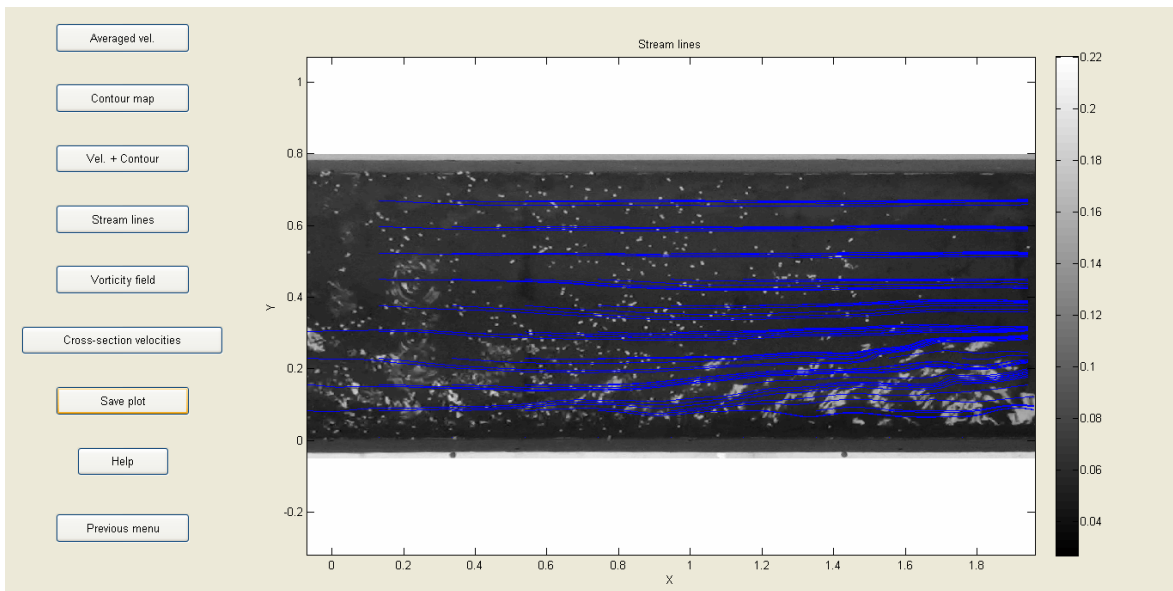


Figura 4.17. Líneas de flujo obtenidos con Mat\_LSPIV

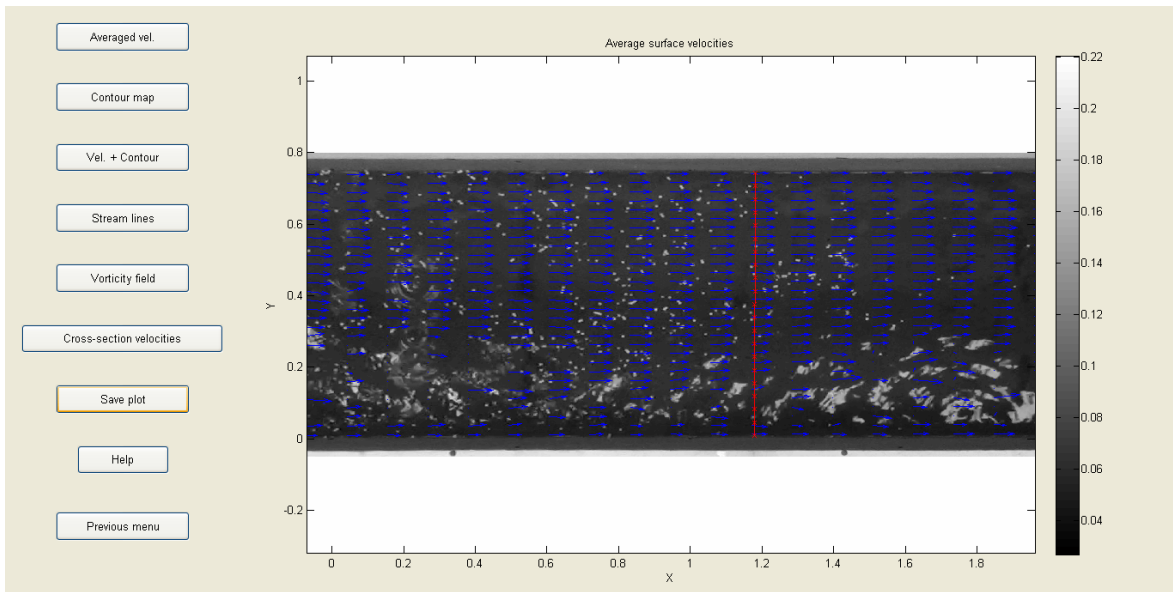


Figura 4.18. Perfil transversal de velocidades obtenido con Mat\_LSPIV

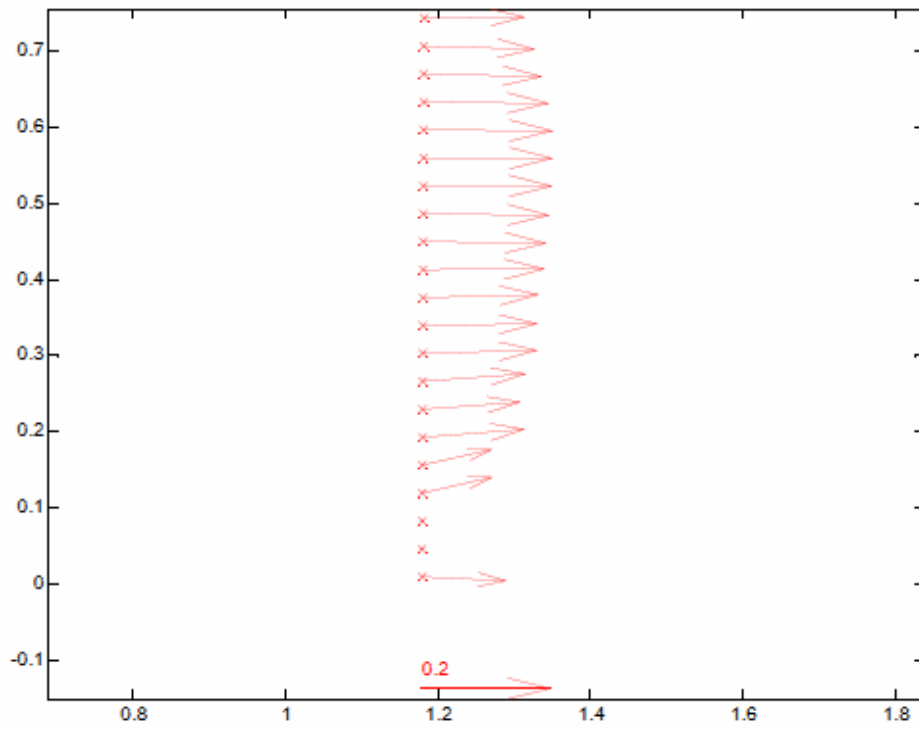


Figura 4.19. Vectores del perfil transversal de velocidades obtenidos con Mat\_LSPIV

## 5.2 Resultados en canales con flujo más complejo

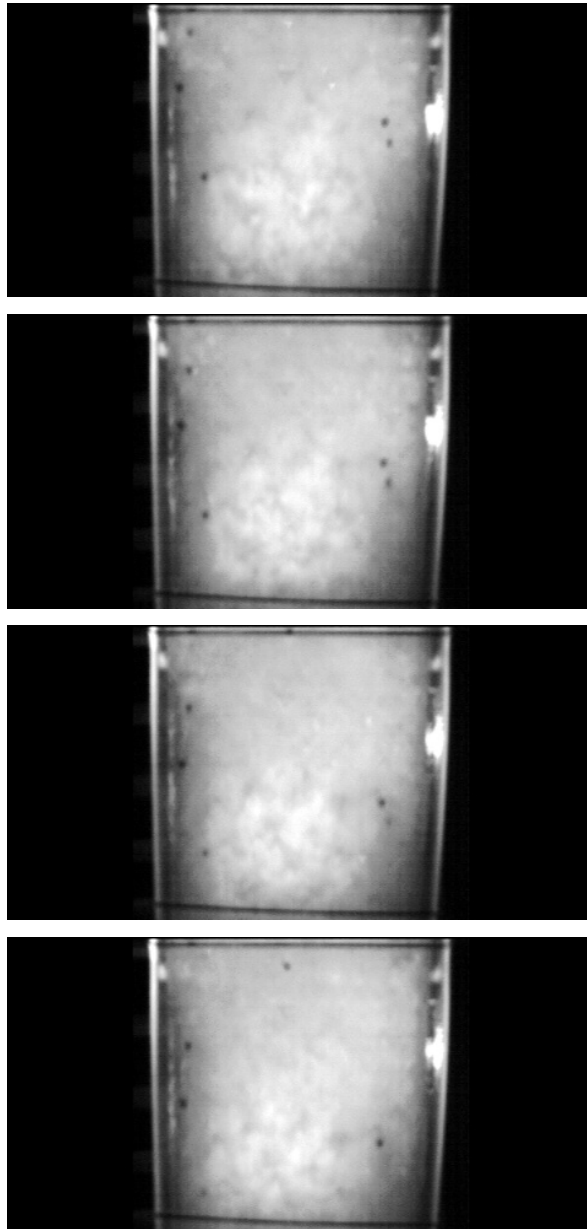


Figura 4.20. Secuencia de fotos tomadas sobre el modelo de vertedor "Huapachic" en el IMTALAB. El sembrado y procesamiento de los datos se vuelve muy difícil en este caso, debido a la alta velocidad del agua ( $\approx 3.5$  m/s)

# Bibliografía

- Adrian, R. J. (1991). "Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics". *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1), pp. 261-304.
- Aya,S.; Fujita, I. y Yagy, M. (1995). "Field observation of flood in a river by video image analysis" *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 39, pp. 447-452.
- Bieri, M.; Jenzer, J.; Kantoush, S. y Boillat, J.L. (2009). "Large Scale Particle Image Velocimetry applications for complex free surface flows in river and dam engineering". Paper present at 33rd Congress. Int. Assoc. of Hydraul. Eng. Res.
- Bradley, A.; Kruger, A.; Meselhe, E. y Muste, M. (2002). "Flow measurement in streams using video imagery". *Water Resources Research*. 38(12), pp. 1315+
- Collins, M. J. y Emery, W. J. (1988). "A computational method for estimating sea ice motion in sequential seasat synthetic aperture radar imagery by matched filtering". *Journal of Geophysical Research – Oceans*. 93(C8), pp. 9241-9251.
- Creutin, J. D.; Muste, M.; Bradley, A.; Kim, S. C. y Kruger, A. (2003). "River gauging using PIV technique: a proof of concept experiment on the Iowa River". *Journal of Hydrology*. 227(3-4), pp. 182-194.
- Creutin, J. D.; Muste, M. y Li, Z. (2002). "Traceless Quantitative Imaging Alternatives for Free-Surface measurements in Natural Streams". 113(40655), pp. 38-38.
- Dermisis, D.C. y Papanicolaou A.N. (2009), "Fish passage over hydraulic structures in Midwestern River of the USA", *Journal River Basin Management*, 7(4), pp. 313-328
- Fox, J.F. y Belcher, B.J. (2009). "Comparison of LSPIV, ADV y PIV data that is decomposed to measure the structure of turbulence over a gavel-bed". Paper present at 33rd Congress. Int. Assoc. of Hydraulic Engineering Research.
- Fox, J.F. y Belcher, B.J. (2011). "Comparison of macroturbulence measured using decomposition of PIV, ADV and LSPIV data". *Journal of Hydraulic Research*. 49(1), pp. 122-126.
- Fujita, I.; Aya, S. y Deguchi, T. (1997). "Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle". Paper present at 27th Congress. Int. Assoc. of Hydraulic Engineering Research. San Francisco, California.

- Fujita, I. y Hino, T. (2003). "Unseeded and Seeded PIV Measurement of River Flow Videotaped from a Helicopter". *J. vis.* 6(3), pp. 245-252.
- Fujita, I.; Watanabe, H. y Tsubaki, R. (2007). "Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique. The space-time image velocimetry". *International Journal of River Basin Management*. 5(2), pp. 105-114.
- Fujita, I.; Muste, M. y Kruger, A. (1998). "Large-Scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic applications". *Journal of Hydraulic Research*. 36(3), pp. 397-414.
- Hauet, A. (2007) "User Manual Mat\_LSPIV". IIRH – Hydrosience & Engineering, The University of Iowa, Iowa City, USA
- Hauet, A.; Creutin, J. y Belleudy, P. (2008a) "Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharger using numerical simulation". *Journal of Hydrologic*, 349(1-2), pp 178-190.
- Hauet, A.; Kruger, A.; Krajewski, W.; Bradley, A.; Muste, M.; Creutin, J. y Wilson, M. (2008b) "Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Base Method". *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), pp 105-110.
- Holland, K.T.; Holman, R.A. Lippmann, T.C. (1997), "Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22(1), pp. 81-92
- Jaehne, B. (1997), *Digitale Bildverarbeitung*, 4th edition, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Jasek, M.; Muste, M.; Ettema, R. y Kruger, A. (2001). "LSPIV and Numerical-Model Estimation of Yukon River Discharge During an Ice Jam Near Dawson". pp. 223-235.
- Jodeau. M.; Hauet, A.; Paquier, A.; Coz, J. Le y Dramais, G. (2008). "Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow condition". *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2), pp. 117-127.
- Kantoush, S.; Bollaert, E.; Cesare, G.; Boillat, J.L. y Schleiss, A. (2006). "Flow Field Investigation in a Rectangular Shallow Reservoir using UVP, LSPIV and numerical model". paper presented at 5th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, pp.129-133.
- Leese, J. A.; Novak, C. S. y Clark, B. B. (1971). "An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation". *J. Appl. Meteorology*, 10, pp. 118-132.
- Meselhe, E.A.; Peeva, T. y Muste, M (2004), "Large Scale particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows", ASCE, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), pp. 937-940

- Muste, M.; Fujita, I. y Hauet, A. (2008b). "Large-scale particle image velocimetry for measurement in riverine environments". *Water Resources Research*, 44, paper W00D19.
- Muste, M.; Kim, W. y Fulford, J.M. (2008a). "Desarrollo de la tecnología hidrométrica: instrumentos nuevos y emergentes para trazar los mapas de las condiciones hidrodinámicas de los ríos". *Boletín de la OMM*. 57(3), pp. 163-169.
- Muste, M.; Xiong, Z.; Bradley, A. y Kruger, A. (2000). "Large-scale Particle image Velocimetry — a Reliable tool for Physical Modeling". 104(40517), pp. 311-311.
- Muste, M.; Xiong, Z. y Kruger, A. (1999). "Error estimation in PIV applied to large scale flows" .paper presented at 3rd International workshop on Particle Image Velocimetry, Univ. of Calif., Santa Barbara, Calif., 16-18 sep.
- Muste, M.; Xiong, Z.; Schöne, J. y Li, Z. (2004a). "Validation and Extension of Image Velocimetry Capabilities for Flow diagnostic in hydraulic modeling". *Journal Hydraulic Engineering*, 130(3), pp 175-185.
- Raffel, M.; Willer, C.E. y Kompenhans, J. (1998). "Particle Image Velocimetry: A Practical Guide". New York