

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

APLICACIÓN DE TÉCNICAS BASADAS EN SISTEMAS DE VIDEO PARA
LA MEDICIÓN DE VARIABLES HIDRODINÁMICAS

Juan David Osorio-Cano¹, Andrés Osorio Arias¹, Francisco Mauricio Toro¹

¹Grupo de investigación en Oceanografía e Ingeniería de Costas (OCEANICOS), Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín,

jdosori0@unal.edu.co, afosorioar@unal.edu.co, fmtoro@unal.edu.co, raul.medina@unican.es

RESUMEN

Dada la necesidad actual de contar con información para el análisis de procesos morfodinámicos y a la escasa información hidráulica e hidrológica, particularmente en Colombia, se recopila información con ayuda de métodos tradicionales los cuales presentan limitaciones desde el punto de vista de la resolución espacio- temporal y de sus costos de adquisición, además de las dificultades que resultan al momento de querer contar con datos cuando se presentan condiciones extremas del flujo, las cuales ponen en riesgo no solo el funcionamiento de los equipos sino también la seguridad de los operarios. Este tipo de situaciones nos hace pensar en la necesidad de implementar técnicas alternativas que no impliquen mediciones directas (in situ) sobre el flujo. Se estudian entonces algunas técnicas innovadoras basadas en sistemas de video y procesamiento digital de imágenes, que permitan cuantificar sin contacto con el flujo, variables hidrodinámicas tales como velocidades de flujo y caudales en condiciones de laboratorio. Se comparan además los resultados de las técnicas de video con datos reales medidos in situ, donde se obtienen errores de estimación inferiores al 2.5%.

ABSTRACT

Given the current need of information for the analysis of morphodynamic processes and the lack of hydraulic and hydrologic data, particularly in Colombia, information is collected using traditional methods which have spatial and temporal resolution limitations and also high acquisition costs. In addition, difficulties result from wanting to have data when there are extreme flow conditions, which endanger not only the equipment performance but also operators' safety. This type of situation reminds us the need to implement alternative techniques that do not involve direct measurements (in situ) on the flow. We explore some innovative techniques based on video systems and digital image processing, to quantify without contact with the flow, hydrodynamic variables such as flow rates and volumes in laboratory conditions. It also compared the results of video techniques with real data measured in situ, where estimation errors are obtained less than 2.5%.

PALABRAS CLAVE

Sistemas de video, procesamiento digital de imágenes, variables hidrodinámicas.

INTRODUCCIÓN

En materia de recursos hídricos, el conocimiento y la información sobre el comportamiento del agua es esencial en importantes aplicaciones. Sin embargo, uno de los principales problemas que resultan al momento de realizar una actuación sobre el recurso es la falta de información que permita evaluar el alcance y el impacto de estas intervenciones. Con el fin de suplir esta deficiencia se ha venido recopilando durante las últimas décadas información hidrológica con ayuda de estaciones limnimétricas, aforos mediante correntómetros ó mediante tecnología acústica (ADCP), los cuales en algunos casos resultan muy costosos en cuanto a mantenimiento y operación o no permiten medir bajo condiciones extremas de flujo, ya que se pone en peligro la vida del operario y la seguridad de los equipos.

En los últimos años, nuevos métodos basados en sistemas de video y procesamiento digital de imágenes han surgido como alternativa para el análisis de variables ambientales, permitiendo obtener de manera remota información de las características del flujo en tiempo real y sin contacto con el flujo (Muste et al, 2008), logrando de esta manera registros de series lo suficientemente largas tanto en condiciones medias como extremas, con una resolución espacio-temporal adecuada, que permite cuantificar y evaluar de forma precisa los cambios sobre los ríos y los procesos hidrodinámicos subyacentes, cuyo entendimiento es necesario para una adecuada gestión del recurso.

El uso de los sistemas de video se basa en la identificación visual de características y procesos de interés en las imágenes captadas mediante las cámaras y la obtención de sus coordenadas reales. Un pilar fundamental de esta técnica es la automatización de tareas, que permite disponer de una base de datos compuesta por un número de imágenes para cada día y hora según una determinada cámara. Con las imágenes almacenadas se puede realizar un análisis de la evolución espacio-temporal de los fenómenos de interés. La flexibilidad del sistema es máxima: se puede controlar completamente de forma remota, variar la frecuencia de toma de imágenes, el envío de los datos, así como otros parámetros de control del sistema.

Las imágenes tomadas poseen la información de la intensidad de cada píxel en cada uno de los colores del espectro RGB (Red Green Blue). Esta información es representada por una matriz de tres capas, cada una con la dimensión de u por v . Donde: u , son los píxeles en horizontal y v los píxeles en vertical.

La intensidad de cada color puede variar desde 0 hasta 255, siendo el resultado de la intensidad de $R=0$, $G=0$ y $B=0$ el negro y el opuesto (intensidad $R=255$ $G=255$ y $B=255$) el blanco. Así, existen más de 16 millones de colores.

Los desarrollos en las últimas tres décadas en óptica, láser, electrónica y tecnologías relacionadas con computadoras han facilitado la implementación de técnicas basadas en imagen para visualizar y cuantificar las características de un flujo en condiciones de laboratorio.

El objetivo principal de este trabajo es entonces la aplicación de técnicas basada en sistemas de video para la toma de datos, el procesamiento y la generación de información hidrodinámica (principalmente velocidades de flujo y caudales), cuya validación se hace a partir de datos medidos en condiciones de laboratorio. A continuación se describen los datos empleados para la aplicación de la técnica, así como la metodología empleada, los resultados y conclusiones más relevantes.

TOMA DE DATOS

Con el fin de evaluar las técnicas de medición de velocidades superficiales de una manera rápida, sencilla y a bajo costo, se realizaron en diciembre de 2008 ensayos sobre el canal de hidráulica de la Unidad de Investigación de Socavación y Agradación (UISA) de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá (Figura 1-a). El canal tiene un ancho aproximado de 1.47 m y una longitud que sobrepasa los 7 m. Estas características son importantes ya que se buscaba en parte reducir los efectos de escala que pueden generarse al trabajar con canales de anchos inferiores a 50 cm donde aparecen otros efectos de borde (tipo ondas diamantes) que no hacen parte del alcance de este estudio.

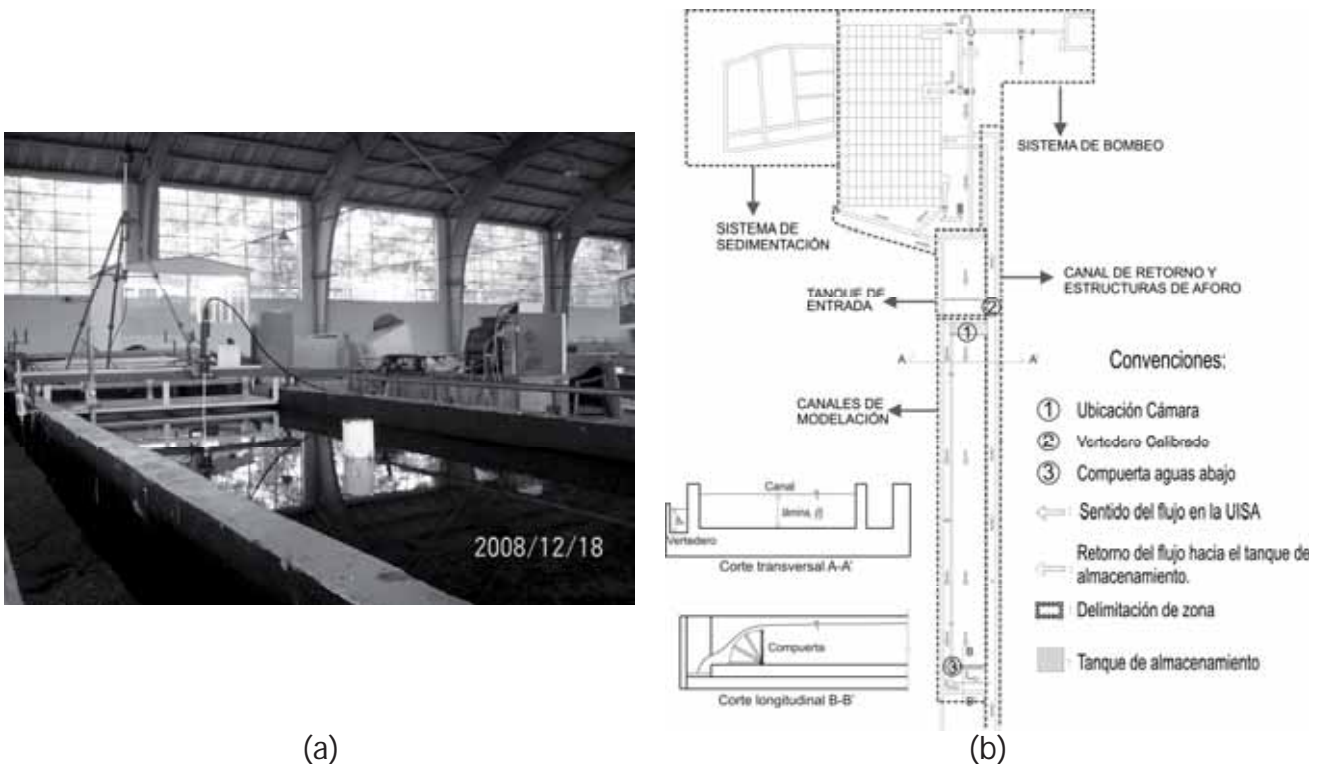


Figura 1.-Esquema del montaje para la toma de datos sobre el Canal de hidráulica de la UISA (UNAL - Bogotá).

Para la aplicación de la técnica se tomaron imágenes sobre la superficie del flujo en movimiento, al tiempo que se medían los caudales y las profundidades de flujo. En este caso los caudales en el canal son obtenidos a través de un vertedero calibrado, cuya ecuación de calibración es:

$$Q_v = 0.3794 * h_v^{1.444} \quad [1]$$

donde h_v es la profundidad en centímetros medida aguas arriba del vertedero calibrado (ver Figura 1-b, Corte transversal A-A') y Q_v es el Caudal en l/s.

Conocido el caudal, es posible estimar la velocidad media de la sección (V_m), a partir del área mojada, $A_s = b * l \text{ cm}^2$, donde $b=147 \text{ cm}$ es igual al ancho del canal y " l " corresponde a la lámina de agua medida en el centro del canal (ver Figura 1-b, Corte transversal A-A'). La siguiente expresión permite obtener el valor de la velocidad media en cm/s.

$$V_m = Q_v \cdot \frac{1000}{A_s} \quad [2]$$

Este procedimiento permitiría entonces la comparación entre la velocidad media estimada (V_m) y la velocidad superficial (V_s) la cual se estima mediante las imágenes tomadas a partir del sistema de video como se explica más adelante. Dichas imágenes se obtuvieron en formato *.jpg (resolución 1024x768) con una cámara de video Stingray F-080B/C con una lente de 8.5 mm, adaptada al PC

de captura con una tarjeta controladora tipo firewire 1394. La ubicación de la cámara y el esquema en planta del canal empleado con todos sus elementos se presenta en la Figura 1-b.

La toma de datos (imágenes) se hace a través de un software de captura denominado "HORUS-eye", elaborado por la Universidad de Cantabria - España, como parte de diferentes proyectos de investigación para el monitoreo en costas y ríos. El software permite especificar en un archivo de configuración aspectos generales tales como el formato de la imagen (bmp, jpg, png, y gif), y si se van a generar o no imágenes en miniatura para la publicación de estas en un servidor web por ejemplo. Otros aspectos son el tipo de cámara que se emplea para la toma de datos, la velocidad de obturación de las cámaras y la velocidad de transferencia de las imágenes a través de un puerto firewire (este parámetro es importante sobre todo cuando se tienen cables demasiado largos hasta las cámaras). En cuanto al tipo de captura, en el archivo de configuración se especifica qué tipo de imágenes se van a generar (instantáneas, promediadas o de varianza), así como el tiempo de captura entre cada imagen instantánea. También es posible generar un subgrupo de imágenes a más alta frecuencia (denominado stack) las cuales se almacenan en un archivo binario (*.dat), que contiene toda la información en RGB de cada frame capturado.

Para obtener suficientes medidas de velocidad media en el canal y contrastar con las velocidades superficiales obtenidas a partir de la técnica de video, se simularon condiciones de trazadores, agregando sobre la superficie del agua elementos artificiales hechos en Poliestireno expandido (conocido comúnmente en Colombia como ICOPOR), para distintas condiciones de caudales y velocidad en superficie, descritas mediante los siguientes dos experimentos:

Experimento No. 1: Considera un caudal fijo (55.8lt/s) sobre el canal y variación de la posición de la compuerta aguas abajo (corte longitudinal B-B en Figura 1-b), desde una posición vertical inicial hasta una posición horizontal final para obtener distintas velocidades de flujo en superficie. Los datos registrados se presentan en la Tabla 1.

Experimento No. 2: Considera diferentes caudales de flujo sobre el canal, con la compuerta fija en posición horizontal. El caudal sobre el canal se estima a partir de la profundidad (h_v) media sobre el vertedero (corte transversal A-A, Figura 1-b) y la ecuación de calibración del mismo.

En la Tabla 1 se presentan las mediciones obtenidas para el Experimento No. 1, mientras que en la Tabla 2 se presentan las características medidas para cada uno de los casos de caudal del Experimento No. 2. En la columna 1 de cada Tabla se describe el caso para el cual se tiene una lámina y una profundidad medida (columnas 2 y 3 respectivamente). La columna 4 presenta el caudal estimado a partir de la ecuación de calibración del vertedero (Ec. [1]) y la columna 5 presenta el valor de la velocidad media (V_m) calculada a partir de la ecuación [2] conocidos el área de la sección transversal (A_s) y el caudal (Q_v).

Tabla 1.- Datos medidos y estimados durante el Experimento No. 1

Caso No.	lámina $l(cm)$	Profundidad $h_v(cm)$	Caudal $Q_v(l/s)$	Velocidad $V_m(cm/s)$
1	30.00	31.70	55.8	12.65
2	28.00	31.70	55.8	13.56
3	26.50	31.70	55.8	14.32
4	23.00	31.70	55.8	16.50
5	18.20	31.70	55.8	20.86
6	16.50	31.70	55.8	23.01

Tabla 2.- Datos medidos y estimados durante el Experimento No. 2

Caso No.	lámina $l(cm)$	Profundidad $h_v(cm)$	Caudal $Q_v(l/s)$	Velocidad $V_m(cm/s)$
1	16.50	31.00	54.0	22.27
2	16.20	30.80	53.5	22.47
3	14.80	26.50	43.1	19.80
4	14.50	25.00	39.6	18.58
5	14.00	23.00	35.1	17.06
6	13.50	22.00	32.9	16.59
7	13.00	20.80	30.4	15.89
8	12.80	20.20	29.1	15.47
9	12.80	20.20	29.1	15.47

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Para el análisis de las imágenes obtenidas en cada uno de los Experimentos, se emplearon dos técnicas de video basadas en procesamiento digital de imágenes conocidas como: 1) Técnica de imágenes de varianza y 2) Técnica de segmentación por umbrales y discretización de trayectoria (Osorio-Cano, 2010).

1) Técnica de imágenes de Varianza

Sabiéndose que una imagen de varianza, en este caso, es una imagen que representa la varianza de la intensidad de los píxeles de las imágenes, tomadas consecutivamente a cada segundo en un intervalo de tiempo predefinido, a través de una escala de colores en que el extremo izquierdo, donde la varianza es cero, presenta el "color negro" y en el otro extremo, donde la varianza es máxima presenta el color blanco. Así, el espacio entre cada punto dejado por el trazador en la imagen de varianza representa el desplazamiento del objeto en un tiempo Δt

La primera técnica consiste entonces en medir la varianza de la intensidad de los píxeles de un grupo de imágenes almacenadas y detectar, a partir de la imagen resultado, las trayectorias o rutas de posibles trazadores (partículas o elementos) que viajan sobre la superficie del flujo y que se aprecian como puntos en blanco sobre la imagen de varianza (Figura 2-a).

Para cada uno de los Casos que componen cada Experimento, se tomaron alrededor de 15 imágenes de varianza, las cuales se obtuvieron a partir de la varianza de un grupo de 20 imágenes tomadas cada $\Delta t = 1s$.

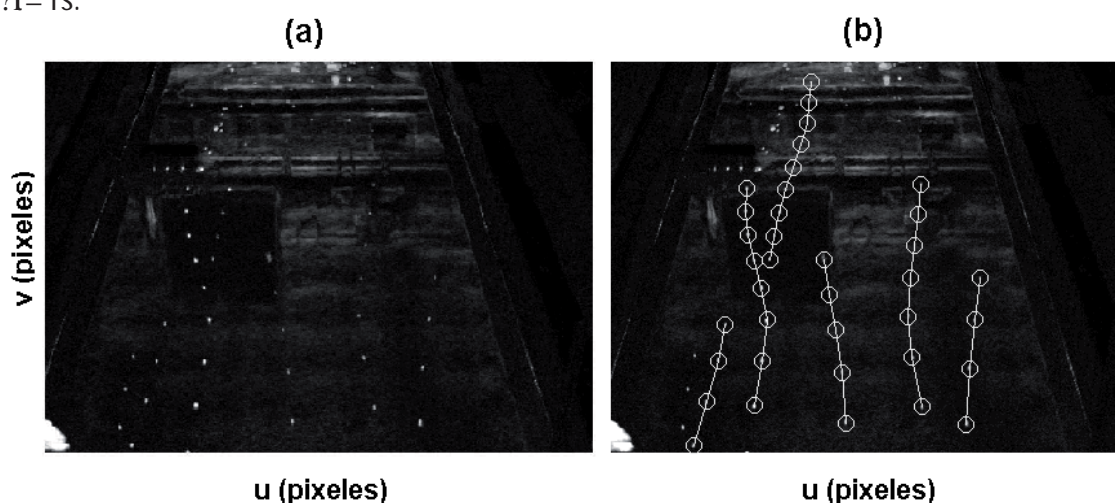


Figura 2.- (a) Imagen de varianza y (b) marcación manual sobre la imagen para determinar trayectorias sobre la superficie del flujo. Cada uno de los puntos en blanco representa la posición de los trazadores en el tiempo, donde en este caso $dt = 1s$ (intervalo transcurrido entre la toma de una imagen y otra).

A partir de la marcación manual sobre la imagen de varianza, se obtienen las coordenadas (u,v) de cada trazador y mediante una transformación del plano de la imagen al plano real del terreno (Holand et al, 1997) se obtienen las coordenadas (x,y) de cada punto sobre la trayectoria. Una vez obtenidas las posiciones de cada partícula y el tiempo de captura, es posible calcular la velocidad instantánea de cada partícula en cada una de las trayectorias.

La figura 3-a presenta el ajuste lineal entre la velocidad superficial (V_s) medida a partir de las imágenes de video y la velocidad media de la sección (V_m) y la Figura 3-b presenta el ajuste potencial entre la velocidad superficial (V_s) y la lámina de flujo (l) para el experimento No.1. De igual manera, en la figura 4 se presentan los ajustes obtenidos para el Experimento No. 2.

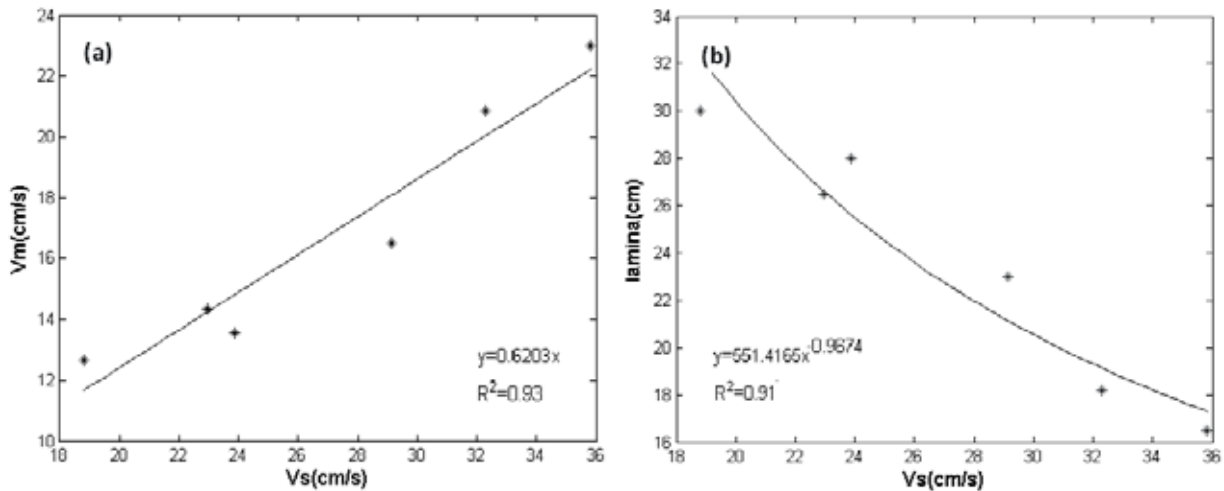


Figura 3.- (a) Ajustes entre la velocidad superficial (V_s) y la velocidad media (V_m) y (b) entre la velocidad superficial (V_s) y la lámina de flujo (l) para el Experimento No. 1.

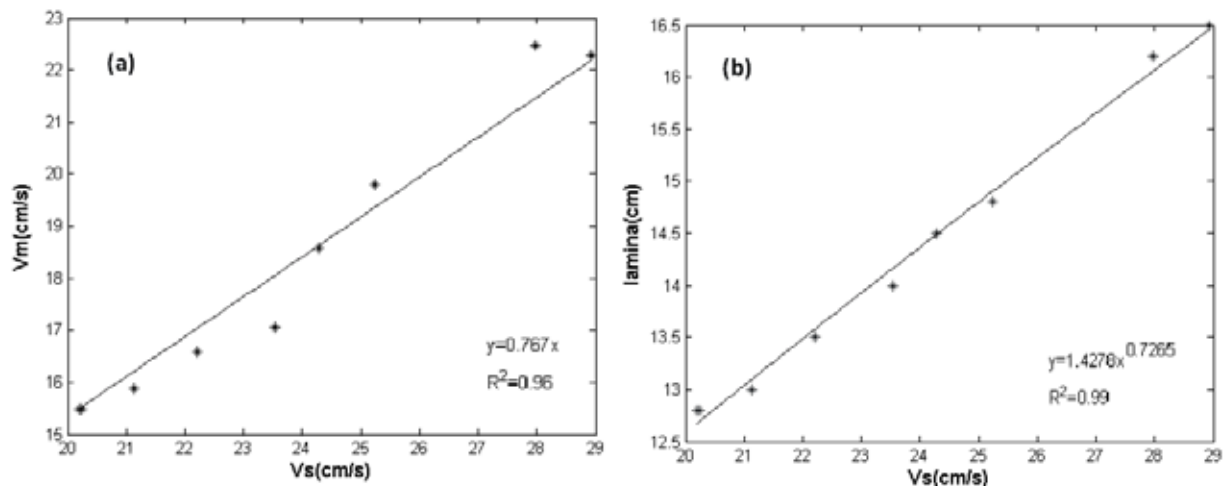


Figura 4.- (a) Ajustes entre la velocidad superficial (V_s) y la velocidad media (V_m) y (b) entre la velocidad superficial (V_s) y la lámina de flujo (l) para el Experimento No. 2.

De los ajustes presentados en la figura 3-a y 4-a, es de notar la alta proporción de la variable dependiente, V_m , explicada por la variable independiente V_s a través del coeficiente de determinación cercano al valor de 1 en ambos Experimentos ($R^2=0.93$ y 0.96 respectivamente). Aunque no es objeto de esta investigación, se encontraron factores que relacionan la velocidad media del flujo con la velocidad superficial de 0.62 y 0.77 para cada experimento respectivamente. Aunque en la literatura (Rantz, 1982) se sugieren valores alrededor de 0.85, este asunto sigue siendo tema de discusión e investigación donde relacionan este factor con características como el material del lecho del fondo, la rugosidad en las paredes, la profundidad de la lámina del flujo, etc.

Es de aclarar además que la velocidad media del canal, dado lo poco profundo de la lámina de agua (lámina máxima = 30 cm), no se obtuvo midiendo en diferentes puntos sobre la vertical (0.2h, 0.6h y 0.8h) como sería lo más adecuado, sino como una estimación indirecta a partir del caudal obtenido vía curva de gastos y el área mojada de la sección obtenida a partir de la lámina de flujo medida en la mitad de la sección. Por este motivo, entre otros, es posible que los factores de proporción entre V_m y V_s obtenidos difieran en parte del valor reportado comúnmente en la literatura.

Para el Experimento No. 1 no existe una relación directa entre el caudal y la velocidad del flujo, debido a que el caudal se mantuvo constante durante todo el experimento; sin embargo si existe una relación inversamente proporcional entre la velocidad superficial y la lámina de agua, ya que entre más vertical estuviera la compuerta, mayor la lámina de agua y menor las velocidades de flujo y viceversa (Figura 3-b).

Una vez estimada la velocidad media ($V_{m_{est}}$) y la lámina (l_{est}) en función de la Velocidad superficial (V_s), es posible estimar el caudal que fluye por el canal (Q_{est}), empleando la ecuación de conservación de masa dada por:

$$Q\left(\frac{lt}{s}\right)_{est} = V_{m_{est}} \cdot A_{est} = \frac{\text{factor} \cdot V_s \cdot B \cdot (l)_{est}}{1000}, \quad [3]$$

Donde factor y $(l)_{est}$ (cm) se obtienen a partir de los ajustes presentados para el Experimento No. 1 en la Figura 3-a y 3-b respectivamente.

En la tabla 3 se presentan los resultados de velocidades superficiales, velocidades medias estimadas, lámina estimada y caudales estimados a partir de las ecuaciones de ajuste halladas anteriormente para el Experimento No.1. Se presenta además el error relativo, ER(%), calculado mediante la expresión [4] para cada uno de los 6 casos asociados a una posición de la compuerta aguas abajo del canal de hidráulica.

$$\text{Error Relativo, ER(\%)} = \frac{Q_{real} - Q_{est}}{Q_{real}} * 100, \quad [4]$$

Donde $Q_{real} = 55.8 \text{ lt/s}$

Tabla 3.- Resultados Experimento No.1. Caudal estimado a partir de la velocidad media ($V_{m_{est}}$) y la lamina (cm)_{est}, estimadas para cada uno de los 6 casos en función de la Velocidad Superficial (V_s).

caso	$V_s(cm/s)$	$V_m(cm/s)_{est}$	$lámina(cm)_{est}$	$Q(lt/s)_{est}$	error relativo
1	18.8	11.7	32.3	55.3	0.8 %
2	23.9	14.8	25.6	55.8	0.1 %
3	23.0	14.2	26.6	55.7	0.2 %
4	29.1	18.1	21.1	56.1	0.6 %
5	32.3	20.0	19.1	56.3	0.9 %
6	35.8	22.2	17.3	56.5	1.3 %
ER_{prom}					0.6 %

En cuanto al Experimento No. 2 se tiene que la lámina de agua es directamente proporcional al caudal y por tanto a la velocidad de flujo. De esta manera se tienen para este Experimento dos alternativas para el cálculo del caudal. La primera es a partir de la ecuación de conservación de masa tal cual se procedió para el Experimento No. 1 de acuerdo a la ecuación [3], donde factor corresponde a la pendiente de la ecuación de ajuste para el Experimento No. 2 mostrado en la

Figura 4-a y $(l)_{est}$ es la lámina estimada a partir del ajuste presentado en la figura 4-b. Por otra parte, dado que existe una relación directa entre el caudal y la velocidad superficial de flujo, y considerando la bondad del ajuste potencial presentado en la Figura 5, entre estas dos variables, se puede obtener el caudal directamente a través de la siguiente expresión

$$Q_{est} = 0.1148(V_s)^{1.8322} \quad [5]$$

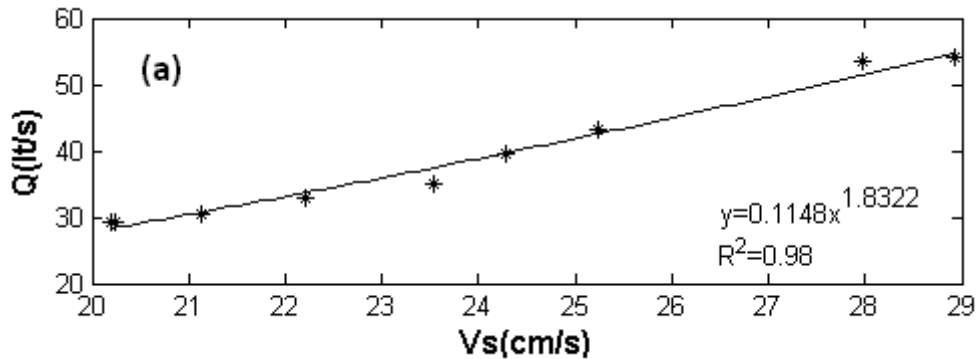


Figura 5.- Ajuste potencial entre la velocidad superficial (V_s) y el Caudal real medido aguas arriba del vertedero calibrado para el Experimento No. 2.

La Tabla 4 presenta los caudales estimados para el experimento No. 2 considerando la ecuación de conservación de masa ($Q1_{est}$ en la columna #4) y la ecuación de ajuste potencial dada por la expresión [5] ($Q2_{est}$ en la columna #6) con sus respectivos errores relativos (ER_1 y ER_2) calculados mediante la ecuación [4].

Tabla 4.- Resultados Experimento No.2. Caudal estimado ($Q1_{est}$, columna #4) a partir de la velocidad media ($V_{m_{est}}$) y la lamina (cm_{est}), y caudal estimado ($Q2_{est}$, columna #6) a partir de la Velocidad Superficial (V_s).

caso	V_s (cm/s)	Q_{real} (lt/s)	$Q1_{est} = V * A$ (lt/s)	ER_1 (%)	$Q2_{est} = f(V_s)$ (lt/s)	ER_2 (%)
1	28.9	54.0	53.7	0.7%	54.6	1.1%
2	28.0	53.5	50.6	5.4%	51.3	4.1%
3	25.2	43.1	42.4	1.6%	42.5	1.3%
4	24.3	39.6	39.7	0.2%	39.7	0.1%
5	23.5	35.1	37.6	7.0%	37.4	6.5%
6	22.2	32.9	34.0	3.3%	33.7	2.3%
7	21.1	30.4	31.2	2.7%	30.7	1.1%
8	20.2	29.1	28.9	0.9%	28.3	2.9%
9	20.2	29.1	29.0	0.5%	28.4	2.5%
			$ER1_{prom}$	2.48%	$ER2_{prom}$	2.44%

2) Técnica de segmentación por umbrales y discretización de trayectorias

Para el desarrollo de esta aplicación se emplearon los datos medidos en la canal de laboratorio de la UISA, bajo las condiciones presentadas durante el Experimentos No.1. Los datos consisten en imágenes (frames) de una pequeña zona del centro del canal (400x600 pixeles) tomadas a una resolución de 10fps (frames per seconds, por sus siglas en inglés), durante 1 minuto para cada uno de los 9 casos que componen dicho Experimento. En la Figura 6 se presenta en escala de grises y a manera de ejemplo, un tramo del conjunto de frames tomados con la cámara y denominado "stack" (entre $t=20.7s$ y $21.7s$) construido para el Caso 1 del Experimento No.1. Cada frame se registra cada $\delta t=0.1s$ y se corresponde con una imagen instantánea de la superficie del flujo.

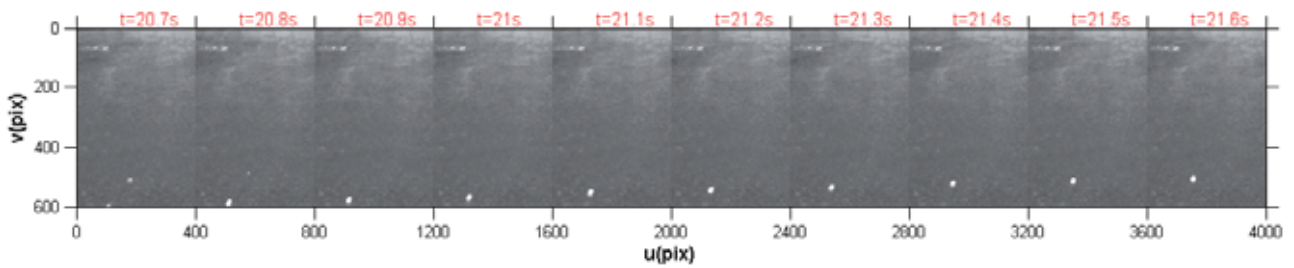


Figura 6.- visualización de 10 frames obtenidos del stack capturado para el Caso 1 del Experimento No. 1.

La segunda técnica empleada consiste entonces en la aplicación de algoritmos automáticos de detección de partículas sobre la superficie del flujo (trazadores artificiales agregados manualmente) y el seguimiento de sus trayectorias en el tiempo. El algoritmo busca identificar objetos a partir de técnicas de binarización y etiquetado de una secuencia de imágenes (recuadros en rojo sobre la Figura 7) y extraer de allí la posición del centroide de cada uno de estos objetos en el tiempo.

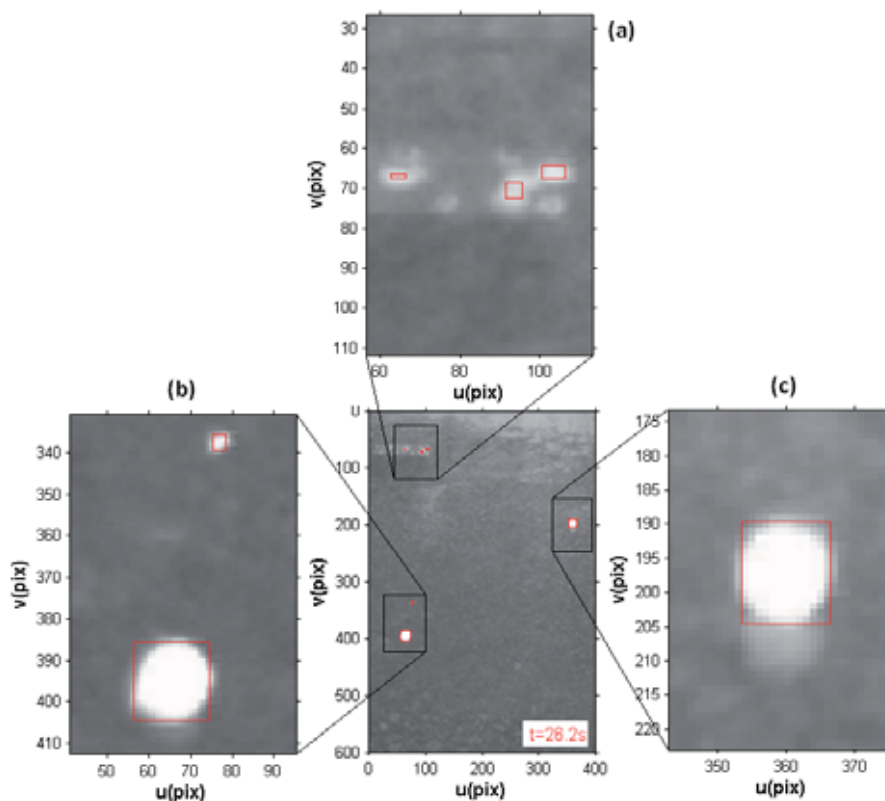


Figura 7.- Identificación de partículas sobre la superficie del flujo a partir de la binarización y etiquetado de la imagen, para el tiempo $t=26.2s$ (Caso 1 del Experimento No. 1).

En la Figura 8-a se presentan superpuestas las coordenadas del centroide de cada elemento identificado en cada uno de los frames que componen el Stack para el Caso 1 del Exp. No. 1, y mediante un algoritmo de discretización de trayectorias (Osorio-Cano, 2010) se obtienen las rutas de cada una de las partículas en superficie (Figura 8-b). Conocidas las coordenadas (u,v) se obtienen posteriormente las coordenadas (x,y) para cada una de las trayectorias empleando el modelo de transformación descrito en Holand et al. (1997), lo que permite el cálculo de las velocidades superficiales.

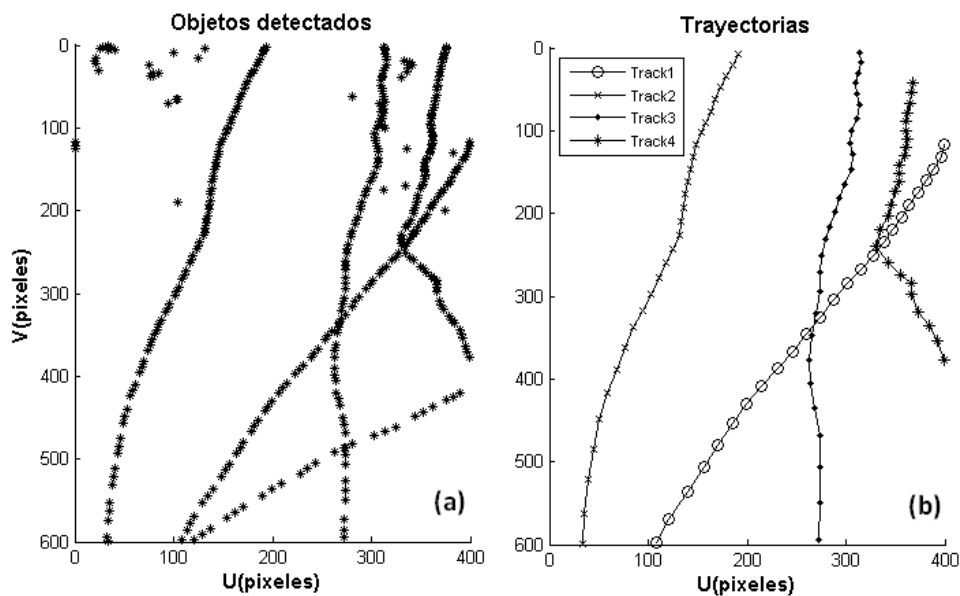


Figura 8.- (a) Coordenadas (u,v) de todos los objetos detectados y (b) Trayectorias discretizadas por elemento. Caso 1, Experimento No. 1.

Dado que esta técnica difiere de la técnica de imágenes de varianza únicamente en el método de detección de las partículas sobre la superficie del flujo, se emplearon los mismo ajustes presentados en la Figura 3 para estimar la velocidad media (V_m)_{est}, la lámina (l)_{est} y el caudal (Q)_{est} sobre el canal para cada posición de la compuerta en función de la velocidad superficial (V_s). Los resultados de esta técnica se presentan en la Tabla 1, donde el error relativo promedio (ER_{prom}) entre el caudal real (55.8 lt/s) y Q _{est} a partir de la técnica de segmentación por umbrales y discretización de trayectorias fue de 0.5%.

Tabla 5.- Caudal estimado a partir de la velocidad media (V_m) y (l)_{est}, para cada uno de los 6 casos del Experimento No.1.

CASO	V_s (cm/s)	V_m (cm/s) _{est}	l ámina(cm) _{est}	Q (lt/s) _{est}	error relativo
1	21.5	13.3	28.3	55.6	0.4 %
2	22.2	13.8	27.4	55.6	0.3 %
3	24.7	15.3	24.8	55.8	0.0 %
4	31.1	19.3	19.8	56.2	0.8 %
5	35.0	21.7	17.7	56.5	1.2 %
6	27.2	16.9	22.6	56.0	0.4 %
				ER _{prom}	0.5 %

CONCLUSIONES

Es posible a partir de las técnicas de video obtener de manera confiable y sin contacto con el flujo, las velocidades y caudales de un flujo en condiciones de laboratorio, lo que representa ventajas en cuanto a la facilidad de toma de datos y la posibilidad de conocer sus características de manera remota a lo largo del tiempo.

Se propuso una metodología para estimar caudales a partir de las velocidades superficiales medidas sobre las imágenes, usando trazadores artificiales sobre la superficie del flujo y empleando ecuaciones de ajuste que relacionan la velocidad superficial de las partículas con la velocidad media de la sección, la altura de la lámina de agua o directamente el caudal que circula a través del canal

A partir de la técnica de imágenes de varianza o la técnica de segmentación por umbrales y discretización de trayectorias, se obtienen errores de estimación en los caudales inferiores al 2.5% y

0.5 % respectivamente y podrían ser adaptadas para la medición en condiciones de campo (rios o quebradas) de las características hidrodinámicas del flujo.

Agradecimientos: A la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECID) por la financiación del proyecto “Aplicación de metodologías y técnicas basadas en sistemas de video para el seguimiento de los problemas ambientales costeros: caso Cartagena, Colombia”, en el cual se enmarca parte del presente trabajo, al igual que a la Universidad de Cantabria (UNICAN) por su apoyo desde el proyecto SAFI (Desarrollo de un prototipo de Sistema de Aforo Fluvial por medio de Imágenes).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Muste, M. and I. Fujita and A. Hauet (2008). “Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments”. *Water Resources Research*, 44, pp.W00D19+.

Holland, K.T. and R.A. Holman and T.C. Lippmann (1997). “Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies”. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22(No.1), pp. 81–92.

Rantz, S. E. (1982). “Measurement and computation of streamflow: Volume 1: Computation of Discharge”. U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap, pp. 2175.

Osorio-Cano, J.D. (2010). “Metodologías y técnicas basadas en sistemas de video para la medición de variables hidrodinámicas”. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.