

CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA Y CINEMÁTICA DE UN CHORRO PULVERIZADO EMPLEANDO LA TÉCNICA ÓPTICA PTV

• Humberto Salinas-Tapia •

Universidad Autónoma del Estado de México

• Cruz Octavio Robles-Rovelo* • Dagoberto Chávez-Carlos •

• Carlos Francisco Bautista-Capetillo •

Universidad Autónoma de Zacatecas

*Autor de correspondencia

Resumen

SALINAS-TAPIA, H., ROBLES-ROVELO, C.O., CHÁVEZ-CARLOS, D. & BAUTISTA-CAPETILLO, C.F. Caracterización geométrica y cinemática de un chorro pulverizado empleando la técnica óptica PTV. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm. 3, mayo-junio de 2014, pp. 125-140.

Los fenómenos naturales o inducidos que involucran el movimiento de gotas motivan análisis para determinar aspectos como la pérdida de suelo por erosión o los cambios que pudieran ocurrir en la tasa de infiltración debido a la energía con la que impactan sobre la superficie del suelo. El diámetro y la velocidad definen la magnitud del efecto. Para caracterizar estas variables se han aplicando diversas técnicas (papel sensible al agua, harina, inmersiones en aceite, ópticas y fotografía). En este sentido, la presente investigación emplea velocimetría por rastreo de partículas (PTV) en la caracterización de gotas emitidas por un pulverizador de flujo. PTV ha encaminado parte de su desarrollo al análisis de la velocidad de sedimentación en flujos bifásicos donde se requiere del sembrado de partículas trazadoras para evaluar el fenómeno; sin embargo, las características experimentales del trabajo obligaron a omitir el uso de estos elementos, por lo que fue indispensable hacer adecuaciones al esquema propuesto por Salinas *et al.* (2006). Las gotas se originaron a una presión hidráulica constante de 175 kPa, las fotografías se capturaron a una distancia de 4.5 m con tres alturas diferentes del pulverizador. La información recolectada (diámetros y velocidades) posibilitó la construcción de campos vectoriales de velocidad. Los resultados presentados derivan del análisis de 1 582 gotas, con las que se obtuvieron valores medios de 0.39, 0.55 y 0.34 mm en diámetro, y 4.02, 3.70 y 3.63 ms⁻¹ en velocidad, para alturas de 0.5, 1.0 y 1.5 m, respectivamente.

Palabras clave: caracterización de gotas, técnica óptica PTV, diámetro, velocidad, análisis estadístico.

Abstract

SALINAS-TAPIA, H., ROBLES-ROVELO, C.O., CHÁVEZ-CARLOS, D. & BAUTISTA-CAPETILLO, C.F. *Geometric and Kinematic Characterization of a Spray Using the PTV Optical Technique*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. V, No. 3, May-June, 2014, pp. 125-140.

*Natural or induced phenomena involving the movement of drops drive the analysis to determine soil loss from erosion and changes that could occur in the infiltration rate as a result of the energy with which they impact the soil surface. The diameter and velocity define the magnitude of the effect. To characterize these variables, a variety of techniques have been applied (water-sensitive paper, flour, oil immersion, optics and photography). The present investigation uses particle tracking velocimetry (PTV) to characterize the drops emitted by a spray flow. The development of PTV partly arose from the analysis of the sedimentation velocity in biphasic flows, which requires tracer particles to evaluate a phenomenon. Nevertheless, the experimental characteristics of the work required omitting the use of these elements, and therefore adjustments to the scheme proposed by Salinas *et al.* (2006) were indispensable. The drops were produced at a constant hydraulic pressure of 175 kPa and the photographs were taken at a distance of 4.5 m with three different sprayer heights. The information collected (diameters and velocities) enabled constructing velocity vector fields. The results presented are based on the analysis of 1 582 drops, for which mean diameters of 0.39, 0.55 and 0.34 mm and velocities of 4.02, 3.70 and 3.63 ms⁻¹ were obtained, with heights of 0.5, 1.0 and 1.5 m, respectively.*

Keywords: *Characterization of drops, optical technique, PTV, diameter, velocity, statistical analysis.*

Introducción

Los fenómenos físicos (naturales o inducidos) donde está presente el movimiento de un fluido encuentran su mejor explicación cuando teoría y experimentación se conjuntan para representar aquellos procesos que ocurren al interior del suceso. En ese sentido, un chorro de agua que se disgrega por efecto de altas presiones forma gotas con diversas características tanto en diámetro como en velocidad que las lleva a recorrer trayectorias diferentes a partir del punto de origen. La determinación experimental de la magnitud de estas variables depende de factores que incluyen las condiciones hidráulicas de operación y los rasgos medioambientales de la región; para su predicción se utiliza la teoría balística (Vories *et al.*, 1987; Dechmi, 2002; Playán *et al.*, 2006). Debido a la complejidad en el análisis del movimiento de las gotas, los modelos balísticos consideran tres hipótesis (Dechmi, 2002): 1) el chorro de agua se disgrega en gotas individuales con diámetros distintos y que se mueven de manera independiente en el aire; 2) el coeficiente de resistencia aerodinámico no depende de la altura, el ángulo de inclinación, la velocidad del viento y el diámetro del dispositivo; 3) el diámetro de la gota condiciona la distancia máxima que recorre.

Se han propuesto múltiples técnicas (papel sensible al agua, harina, inmersión en aceite, fotografía de alta y baja velocidad, entre otras) con la finalidad de valorar a través de la experimentación la tercera hipótesis (Jones, 1956; Magarvey, 1956; Eigel y Moore, 1983; Hauser *et al.*, 1984; Kohl y DeBoer, 1984; Kincaid *et al.*, 1996). En un inicio, algunas de ellas se emplearon para medir el tamaño y la distribución de las gotas de lluvia, otras se implementaron con la intención de evaluarlas en los sistemas de riego por aspersión (Cruvinel *et al.*, 1996; Cruvinel *et al.*, 1999; Salles *et al.*, 1999; Sudheer y Panda, 2000; Montero *et al.*, 2003). De acuerdo con Cruvinel *et al.* (1996), desde 1895 se tienen las primeras

evidencias documentadas de seis técnicas para medir el tamaño y la distribución de las gotas. A finales del siglo XX se aplicaron dos métodos ópticos para determinar su diámetro: el primero se basa en el análisis de la difracción de luz generada por las gotas iluminadas por un haz de luz láser (Kincaid *et al.*, 1996); el segundo, conocido como disdrómetro óptico, mide el diámetro de la partícula a partir de la atenuación de un haz de luz infrarroja durante la caída de las partículas de agua (Hauser *et al.*, 1984; Montero *et al.*, 2003). Con este mismo fin, Sudheer y Panda (2000) proponen otra metodología basada en fotografías de alta velocidad, combinada con técnicas digitales para su análisis, y con ello demostrar que el uso del procesamiento de imágenes permitiría mejorar la técnica, en particular al determinar la relación de la distribución del tamaño de gotas con la presión de operación y las características de las boquillas del aspersor. De forma reciente, Salvador *et al.* (2009) propusieron una técnica sustentada en fotografías de baja velocidad que muestra la trayectoria de las gotas y mediante un procesamiento digital permite calcular su longitud, ángulo, diámetro y velocidad de caída; no obstante, para llegar a obtener resultados confiables conlleva demasiado tiempo; además, esta técnica involucra en una parte del proceso la discriminación de gotas a criterio personal.

El análisis de diversos fenómenos que acontecen en mecánica de fluidos, como en hidráulica, ha presentado avances significativos gracias al desarrollo de técnicas de medición que usan como principio la óptica para evaluar las características deseadas en el caso de estudio analizado. Estas técnicas se dividen en intrusivas y no intrusivas. En la primera categoría se encuentra la técnica de anemometría de hilo caliente (HWA); por otra parte, dentro de las técnicas no intrusivas se encuentran las siguientes: anemometría láser Doppler (LDA), fluorescencia inducida láser (LIF), velocimetría global Doppler (DGV) y anemometría de fase Doppler (PDA), cuya limitación es que son usadas para regiones

pequeñas de análisis en flujos. En otro sentido, gracias al desarrollo de cámaras fotográficas de alta velocidad y surgimiento de equipos sofisticados de iluminación láser, en las últimas dos décadas han evolucionado las técnicas no intrusivas como velocimetría por imágenes de partículas (PIV) y velocimetría por rastreo de partículas (PTV) para análisis bidimensional, así como la técnica estéreo-PIV (S-PIV) y la holografía digital PIV para análisis de flujos en 3D (Adrian, 1991; Jensen, 2004).

Las técnicas ópticas comúnmente usadas en hidráulica y en mecánica de fluidos para determinar las propiedades de un flujo, como velocidad, temperatura, presión, turbulencia, vorticidad, densidad y tamaño de partículas son PIV y PTV (Van Dyke, 1982; Smits y Lim, 2000). Estas técnicas se han enfocado a la medición de los campos de velocidad en fluidos de diversa naturaleza a partir de un sembrado de partículas trazadoras (Adrian 1989; Adrian, 1991; Westerweel, 1993; Raffel *et al.*, 1998).

Para una baja densidad de partículas en la región de flujo analizada se utilizan algoritmos de rastreo individual de las partículas (PTV); para el caso de imágenes con alta densidad de partículas se aplican algoritmos aplicados de forma local al área de interés, como los de correlación cruzada o auto-correlación (PIV) (Virant y Dracos, 1997; Ido *et al.*, 2002) y se desarrollan por medio del teorema de convolución con la inversa de la transformada de Fourier (Crunivel *et al.*, 1996) o con algunos otros métodos, como la transformada de Hough o la envolvente convexa al presentarse superposiciones de partículas (Sang y Yu, 2004); sin embargo, estos procesos consumen más tiempo para el análisis de imágenes, en comparación con la técnica PTV.

La técnica PTV (Particle Tracking Velocimetry, PTV, por sus siglas en inglés) basa su principio de operación en la adquisición de imágenes a alta velocidad y resolución espacial, empleando un dispositivo de carga acoplada (Charge Couple Device, CCD, por sus siglas en inglés) sobre una región de flujo sembrada con partículas trazadoras (de densidad similar a la

del fluido). La región se ilumina con una hoja de luz que proviene de un láser pulsado de doble cavidad, con la finalidad de que al hacer contacto con los trazadores dispersen luz que es grabada por el sensor de la cámara, donde cada pulso ilumina la misma partícula en tiempos distintos, por lo que es posible observarla en dos posiciones diferentes sobre una misma imagen. Después, por medio de un procesamiento digital, se mide la distancia que separa cada par de partículas y considerando el tiempo entre cada pulso de luz se determina la velocidad de las mismas. El procedimiento anterior se automatiza usando algoritmos desarrollados en algún lenguaje de programación, lo que facilita y estandariza el análisis (Prasad, 2000; Salinas *et al.*, 2006). Esta técnica se ha empleado principalmente para el estudio de la velocidad de sedimentación de partículas no cohesivas (arenas) (Salinas y García, 2011; Flores y López, 2012); sin embargo, algunos autores sugieren la posibilidad de implementarla para determinar características de gotas de agua generadas por un pulverizador de flujo, burbujas de aire (cavitación) o partículas sólidas que se desplazan en un tanque de mezclado (Sang y Yu, 2004; Salinas *et al.*, 2011).

El análisis del movimiento de gotas aisladas, como ocurre con la lluvia o el riego por aspersión, ha sido caracterizado por técnicas fotográficas de baja velocidad (Bautista *et al.*, 2009; Salvador *et al.*, 2009), mientras que investigaciones realizadas en flujos bifásicos con partículas sedimentarias (esféricas y no esféricas) a bajas velocidades ($< 16 \text{ cms}^{-1}$) han sido modeladas a través de técnicas ópticas como PIV o PTV (Salinas *et al.*, 2006; Salinas y García, 2011). Sin embargo, las investigaciones de Salvador *et al.* (2009) y de Bautista *et al.* (2009) tienen las desventajas siguientes:

- a) La cantidad de fotografías debe ser grande (500-2 000 imágenes), puesto que un porcentaje considerable de ellas se desecha por no contener gotas, la decisión de incluir o eliminar una imagen recae en el criterio del analista y se basa en la observación a

- detalle de la fotografía, de tal manera que el diámetro y la trayectoria de la gota sean claramente visibles en la imagen.
- b) Los parámetros que caracterizan una gota (diámetro, longitud y ángulo de caída) se obtienen manualmente, lo que ocasiona errores de percepción.
 - c) La caracterización de cada gota requiere entre 4 y 7 min (Salvador *et al.*, 2009; Bautista *et al.*, 2013). Por el contrario, Salinas *et al.* (2006), y Salinas y García (2011) utilizan la técnica PTV para calcular la velocidad de caída de partículas sedimentarias en un fluido en movimiento y reportan ventajas para obtener pares de imágenes instantáneas (2 a 5 ms). Además, por el principio de la técnica, al utilizar pulsos de luz es posible grabar en una misma imagen la posición de la gota en dos tiempos sucesivos y con el procesamiento digital de la imagen determinar un mapa vectorial de velocidades en dos dimensiones (2D) sobre un campo de flujo multifásico (la parte sólida –trazadores– y el fluido –líquido o gas–) para un instante de tiempo específico, a partir del cálculo de los desplazamientos por rastreo individual de las gotas.

El auge que ha adquirido la presurización de los sistemas de riego ha incrementado el interés por el desarrollo de técnicas para caracterizar gotas que viajan a través del aire bajo diferentes condiciones hidráulicas y medioambientales, porque estos aspectos condicionan la energía cinética con la cual impactan sobre la superficie del suelo o bien las pérdidas por evaporación y arrastre. Además, se busca generar metodologías confiables y eficientes en cuanto al tiempo que se emplea para determinar diámetros y velocidades. Con base en lo anterior, esta investigación reporta la caracterización cinemática y geométrica de gotas generadas por un pulverizador de flujo bajo condiciones controladas. En este sentido, el objetivo de esta investigación estuvo encaminado a implementar el algoritmo PTV desarrollado por Salinas *et al.* (2006) para

caracterizar un conjunto de gotas capturadas a distintas alturas respecto a la superficie del suelo, así como la construcción de campos de velocidad en dos dimensiones (2D), a partir de la información registrada en una serie de fotografías tomadas a alta velocidad.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en las instalaciones del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), dependiente de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). En la figura 1 se ilustra de forma esquemática el equipo experimental utilizado.

Para generar las gotas de agua se utilizó un pulverizador de flujo y para su caracterización se empleó el sistema de velocimetría por rastreo de partículas (PTV), instalado en el Laboratorio de Visualización de Flujos de la misma institución. El dispositivo hidráulico utilizado para provocar el chorro de agua pulverizado está conformado por cuatro componentes: 1) depósito cilíndrico con capacidad de 0.8 m³; 2) hidroneumático marca Myers de ½ HP, equipado con tanque regulador de presión y manómetro radial ABS de 600 kPa marca Fimet; 3) pulverizador conformado por una pistola de riego cónica marca Truper (60 mm de diámetro con 150 orificios); 4) tubería de PVC (diámetro, 20 mm; altura, 1.6 m; ángulo de inclinación respecto a la horizontal (θ) de 60°). El sistema de velocimetría PTV cuenta con cinco elementos: a) dispositivo por carga acoplada (cámara digital) marca JAI, con resolución temporal de 30 a 250 cuadros por segundo y espacial de 1600 x 1200 píxeles, equipada con una lente marca Nikkor de 50 mm, con algoritmo de procesamiento; b) láser pulsado de doble cavidad Nd:YAG marca New Wave de 15 mJ; c) accesorios ópticos (espejos y lentes); d) sincronizador de señales para controlar la secuencia de adquisición de imágenes con las pulsaciones de luz láser; e) algoritmo para el procesamiento de imágenes PTV-SED v. 1.0 desarrollado por Salinas *et al.* (2006), las etapas para su funcionamiento se tienen en la figura 2.

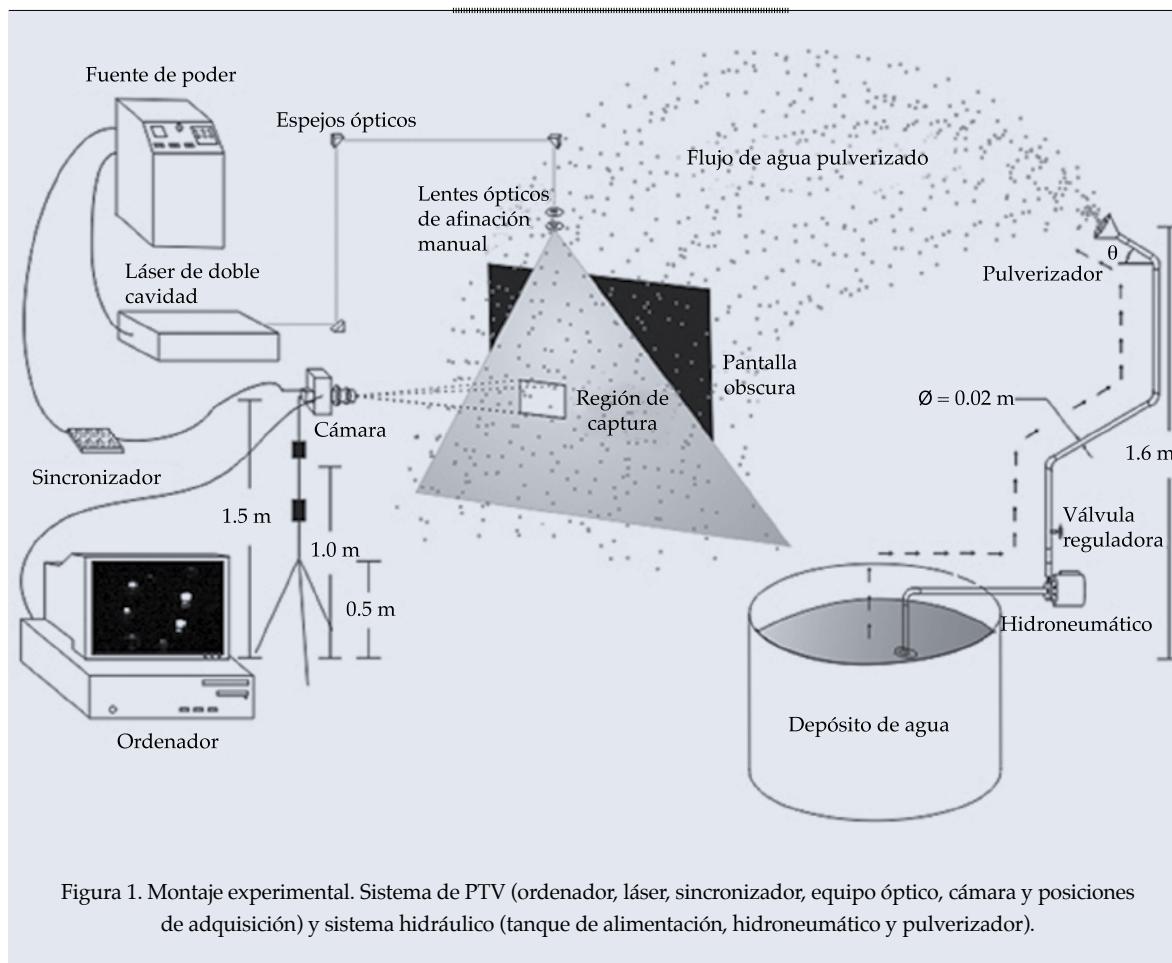


Figura 1. Montaje experimental. Sistema de PTV (ordenador, láser, sincronizador, equipo óptico, cámara y posiciones de adquisición) y sistema hidráulico (tanque de alimentación, hidroneumático y pulverizador).

Adquisición y procesamiento de imágenes

Para generar las gotas se utilizó una presión hidráulica de 175 kPa; la adquisición de imágenes se realizó para tres alturas distintas ($H_1 = 1.5$ m; $H_2 = 1.0$ m; $H_3 = 0.5$ m) y a 4.5 m de distancia respecto del pulverizador. De acuerdo con el principio de la técnica PTV, para determinar los campos de velocidad de fluidos y visualizar el comportamiento del flujo, por lo general se usan trazadores; sin embargo, por la naturaleza de este experimento y dado que el algoritmo de PTV utilizado ha sido aplicado para caracterizar partículas sólidas de tamaños mayores a los trazadores (Salinas y García, 2011), en este experimento las gotas de agua reemplazaron la función de trazadores, mismas que lograron difractar la luz del láser y ser grabadas por el sensor de la cámara.

En consecuencia, las pruebas se realizaron por la noche, con la finalidad de controlar la iluminación en la región de análisis, la cual fue iluminada empleando el láser pulsado de doble cavidad; este contraste permite que la información en las imágenes sea perceptible durante el procesamiento digital (Salinas *et al.*, 2006). Con el apoyo de los espejos ópticos (colocados a 45°) se logró desviar el haz de luz a la zona de visualización, siguiendo una trayectoria horizontal-vertical-horizontal-vertical (figura 1); una vez que el rayo se ubicó en el sitio, fue necesario crear una hoja de luz, lo cual se logró con la combinación de dos lentes, una esférica y otra cilíndrica, para así obtener una superficie iluminada mayor a la que cubre la cámara (60×40 mm). La cámara se instaló de manera perpendicular a la hoja de luz (región de análisis), a una distancia de 1.0 m; además,

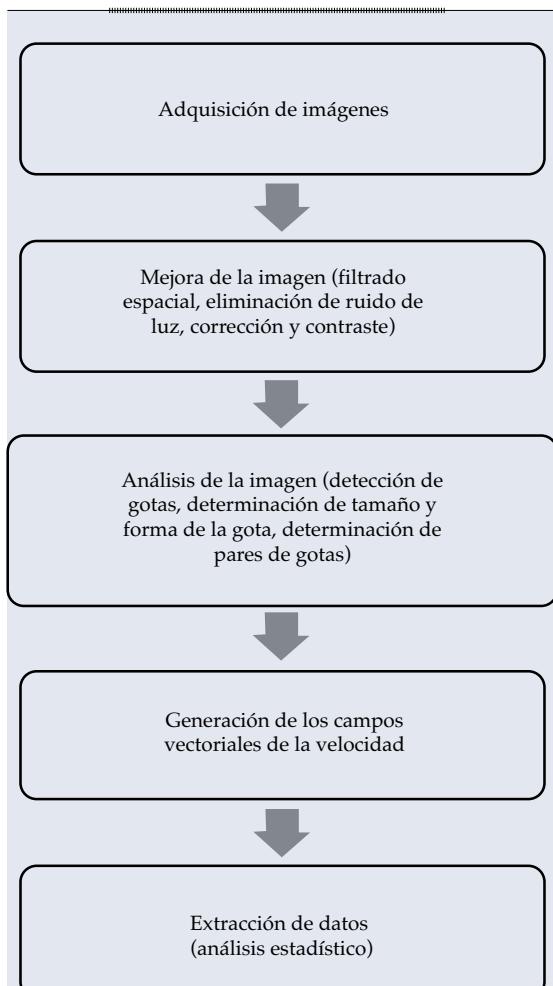


Figura 2. Caracterización de gotas con algoritmo PTV-SED v 1.0.

el espesor de la hoja de luz láser se ajustó a 3.0 mm para garantizar que las gotas incluidas en la caracterización estuvieran en el mismo plano de análisis. Por otro lado, para la adquisición de imágenes utilizando la técnica PTV, se requiere que la frecuencia de láser (pulsos de luz) y la frecuencia de la cámara (número de imágenes por segundo) sean sincronizadas, es decir, que en cada tiempo que se adquiere una imagen, el láser sea pulsado para capturar gotas en las imágenes; este proceso se realizó con un sincronizador de señales manipulado por un computador. En esta investigación se realizaron varias pruebas para acotar los tiempos entre los pulsos de la luz láser (Δt),

con la finalidad de determinar la posición de las gotas generadas en dos tiempos diferentes dentro de una misma imagen; asimismo, se definió el tiempo de exposición (t_{exp}) para detectar la mayor cantidad de gotas. Para este experimento se eligió un $\Delta t = 0.4$ ms y $t_{exp} = 20$ ms (figura 4a). Cabe señalar que para cumplir con estos tiempos, fue necesario realizar la sincronización de la cámara con la fuente de luz láser, para hacer coincidir los dos pulsos con el tiempo de exposición y garantizar que en una misma imagen se grabara la posición de las gotas para cada pulso de luz y así, mediante el procesamiento de las imágenes, calcular el desplazamiento, tamaño y velocidad de las gotas de agua.

Para determinar las características de las gotas (diámetro, posición y velocidad), se utilizó el algoritmo PTV-SED v 1.0, desarrollado originalmente para estudiar la velocidad de partículas sedimentarias en flujos bifásicos (Salinas *et al.*, 2006). Es importante mencionar que para su uso se realizaron ajustes al algoritmo, en particular para determinar la geometría de las gotas, ya que inicialmente el algoritmo detecta partículas irregulares (sedimentos) y las gotas son regulares en geometría. Su funcionamiento comprende dos procedimientos secuenciales y automáticos (figura 2). En el primero se mejora la calidad de la imagen realizando un filtrado espacial (eliminación de intensidad de luz), es decir, se elimina el ruido generado por exceso de luz o por reflejos no controlados durante la adquisición de imágenes, que se debe a la variación aleatoria del brillo o color de la imagen producido por el sensor de la cámara al momento de la adquisición, garantizando con ello que las partículas detectadas sean claramente visibles e identificables por el algoritmo PTV-SED v. 1.0 (figura 3). El segundo procedimiento detecta las gotas en cada pulso, siguiendo cinco etapas (figura 4b): 1) identifica intensidades máximas y mínimas con lo que establece su tamaño; 2) a partir de su geometría, evaluada con la intensidad de cada píxel, se conforma una superficie circular;

3) se obtiene el centroide de cada gota doble pulsada grabada en la imagen, que también es función de la intensidad de los píxeles; 4) calcula las coordenadas (x, y) de los centroides de las gotas, para después determinar las distancias entre ellos ($\Delta x, \Delta y$), y 5) obtiene el vector velocidad (u, v) con la relación siguiente:

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad v = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (1)$$

Para desarrollar las etapas antes mencionadas, es necesario establecer parámetros iniciales según las condiciones de adquisición. En este sentido, para determinar el factor de magnificación, se tomó una imagen de calibración a las tres alturas analizadas; para llevar a cabo esto, se colocó una regla graduada en cm justo en la región de análisis (a 1 m de

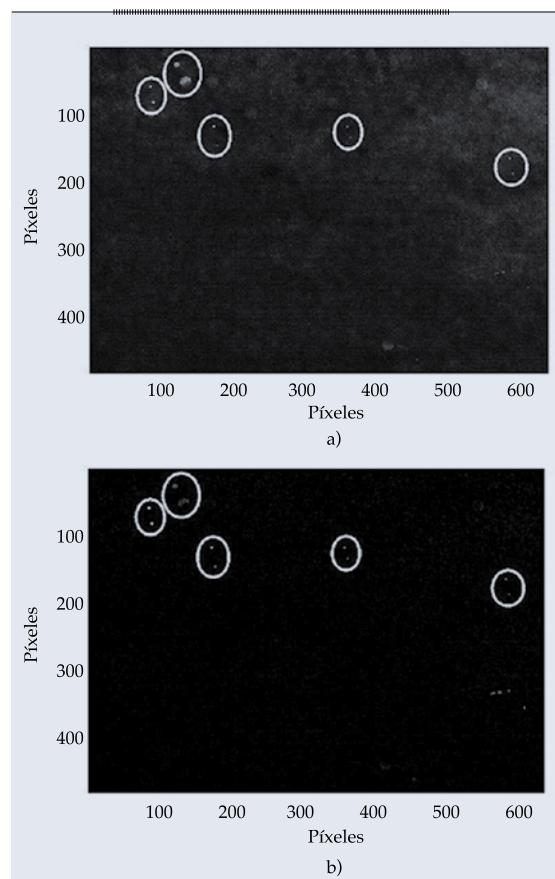


Figura 3. Filtrado espacial para mejorar la calidad de la imagen. a) Fotografía con distorsiones por exceso de iluminación; b) fotografía procesada con el algoritmo PTV-SED v. 1.0.

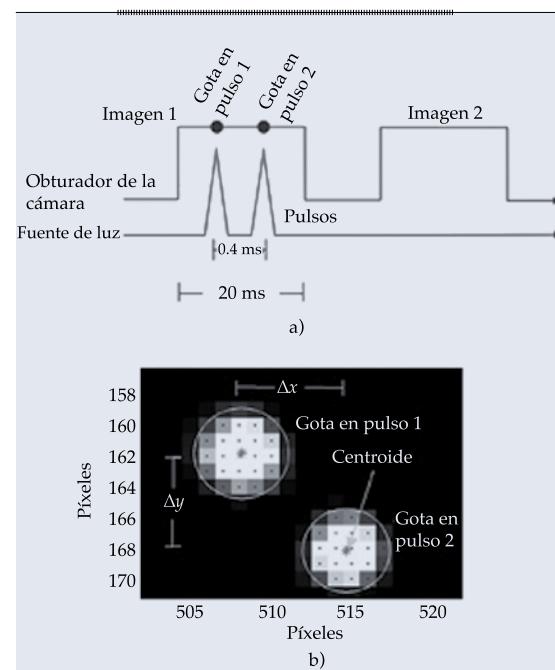


Figura 4. Intervalo de tiempo entre pulsos de luz y gotas identificadas. a) Frecuencias de cámara y láser; b) gotas doble pulsadas, desplazamiento en Δt y centroide de las mismas.

separación a partir de la cámara) previo a la adquisición; este factor se determinó midiendo la distancia en píxeles, equivalente a un cm de la imagen; una vez obtenido, se introduce al algoritmo, garantizando que los datos originados del procesamiento tengan unidad de cm. Así, se presentó una relación de 115, 116 y 122 px cm⁻¹ para el conjunto de imágenes tomadas a 0.5, 1.0 y 1.5 m, respectivamente. La separación entre pulsos de luz láser utilizado en la experimentación fue $\Delta t = 0.4$ ms. Los umbrales máximos y mínimos dependen de la cantidad de brillo o color en las imágenes, y de la cantidad de luz que dispersa una gota; estos valores se registran en RGB y oscilan entre 0 y 255 (Salinas *et al.*, 2006). Para identificar las partículas, se visualizaron 25 imágenes en las tres alturas de análisis, midiendo en cada grupo las distancias y ángulos que apartan las gotas doble pulsadas; de esta manera, se encontraron rangos de separación de 15-24, 12-24 y 15-35 px para H1, H2 y H3, respectivamente; por otro lado, el intervalo angular se definió entre 65 y

90° para todas las gotas.

A pesar de que los tiempos de adquisición son casi instantáneos, en algunas imágenes se detectaron gotas que no fueron perfectamente visibles en el segundo pulso, lo cual indica que salieron del plano de análisis, situación que no permite determinar con precisión el diámetro de la gota, al igual que su centroide; ello se debe principalmente a que las trayectorias de las gotas originadas por el pulverizador presentan un comportamiento disperso en el espacio; aunque se detectan las gotas iluminadas, el diámetro no es el correcto y porque la velocidad también es diferente (figura 5). Por lo tanto, para garantizar que los datos sean correctos, se implementaron algoritmos en MatLab para discriminar las gotas cuya relación entre el diámetro 1 y 2 exceden un 10%, de esta manera se eliminaron alrededor del 30% de gotas; con la finalidad de generalizar y realizar un análisis estadístico de la información, se obtuvieron los diámetros equivalentes que resultan de la media aritmética para el diámetro 1 y 2 de las gotas doble pulsadas.

Análisis estadístico de las gotas

Posterior al procesamiento de las imágenes, se hizo un análisis estadístico en MatLab con la información recolectada. Se determinaron

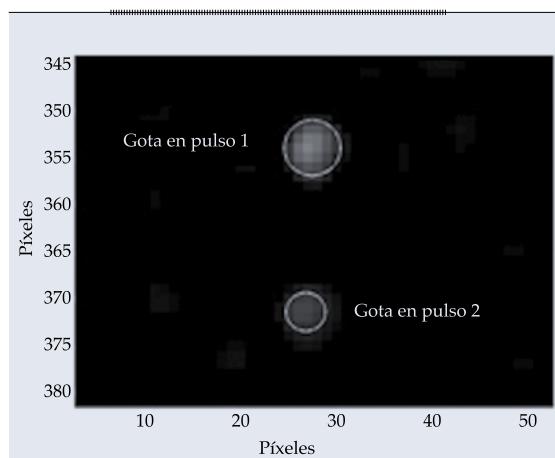


Figura 5. Gotas fuera del plano de análisis. En este caso ocurre una diferencia mayor al 10% entre diámetros.

parámetros de centralidad y dispersión, como la media aritmética (\bar{x}), desviación estándar (S) y coeficiente de variación (CV) (ecuaciones (2), (3) y (4), respectivamente), para diámetros equivalentes y velocidades correspondientes a cada grupo de imágenes. Específicamente para el diámetro, se determinó además la media volumétrica (D_v) correspondiente a la ecuación (5) y la media al 50% del volumen acumulado.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \quad (4)$$

$$D_V = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^4}{\sum_{i=1}^n d_i^3} \quad (5)$$

Para obtener la media al 50% del volumen acumulado (D_{50}) se ordenaron de manera ascendente los diámetros resultantes de cada conjunto de imágenes por separado, posteriormente se calculó su volumen y por último se seleccionó el diámetro de la gota correspondiente al 50% del volumen total acumulado.

De las fórmulas anteriores, x representa los datos analizados (diámetro o velocidad), n es el número total de datos y d corresponde al diámetro de gota (mm).

Campo de velocidades

El algoritmo PTV-SED v. 1.0 arrojó información que describe el comportamiento cinemático de las gotas al caer; estos datos se originaron para cada altura de observación; su finalidad radica en generar campos vectoriales de velocidad en 2D, que surgen aplicando algoritmos

desarrollados en MatLab a los datos originados del procesamiento. Cada mapa de vectores presenta la magnitud, dirección y sentido de las gotas, estos contienen la posición (x, y) en cm de sus respectivos centroides, con referencia al origen de la imagen, así como las resultantes de velocidad para cada gota doble pulsada en unidades de cms^{-1} .

Validación de la técnica óptica PTV

En el procesamiento de imágenes se presentaron algunos errores que fueron puntuamente identificados, los cuales se citan a continuación:

- Sincronía de los equipos, es decir, que la cámara capta gotas de agua cuando se ilumina la región de análisis; para ello se realizaron diversas pruebas, a fin de lograr los tiempos óptimos entre separación de pulsos de luz y de exposición de una imagen, de tal forma que se adquiriera la mayor cantidad de gotas.
- La magnificación y nitidez de las imágenes, para lo cual se realizaron diversos ajustes al enfoque de la cámara y a la distancia de captura.
- La otra fuente de error, y que se considera como la principal, es la detección de los pares de partículas en el procesamiento de las imágenes; para solucionar este problema se siguieron dos criterios de detección: el primero es la distancia mínima y máxima de recorrido de una partícula; el segundo es la dirección; entonces, para cada corrida, se calibraron esos parámetros, de tal forma que se detectara el par correspondiente de cada gota; además, de acuerdo con la aplicación del algoritmo a sedimentos no cohesivos, el grado de error en los resultados es menor al 10%, por lo que al realizar el análisis estadístico y determinar los diámetros de las gotas se tomó ese criterio y se eliminaron las gotas que diferían en más del 10% de diferencia entre el diámetro inicial y final de la gota, que como puede verse es mucho menor al permitido.

Resultados y discusión

Para evaluar las características de las gotas se conformó un conjunto de 1 685 imágenes divididas en tres subconjuntos (H1, H2, H3), cada uno con 541, 572 y 572 imágenes, respectivamente. Antes de analizarlas con el algoritmo PTV-SED v. 1.0 se sometieron a un procedimiento de visualización manual, para seleccionar aquellas que contienen gotas, puesto que las condiciones propias del experimento generan imágenes sin datos y esto supone un problema de ciclado en el funcionamiento del algoritmo.

Del hecho anterior resultó la eliminación del 40% de imágenes sin información; en las restantes se obtuvo, en promedio, dos gotas

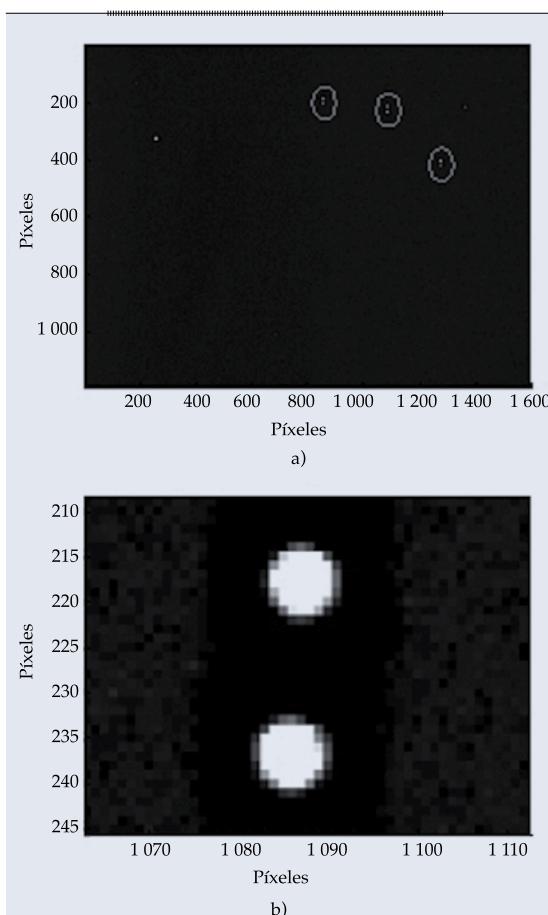


Figura 6. Imágenes adquiridas: a) imagen con baja densidad de gotas; b) acercamiento de la imagen a una gota doble pulsada.

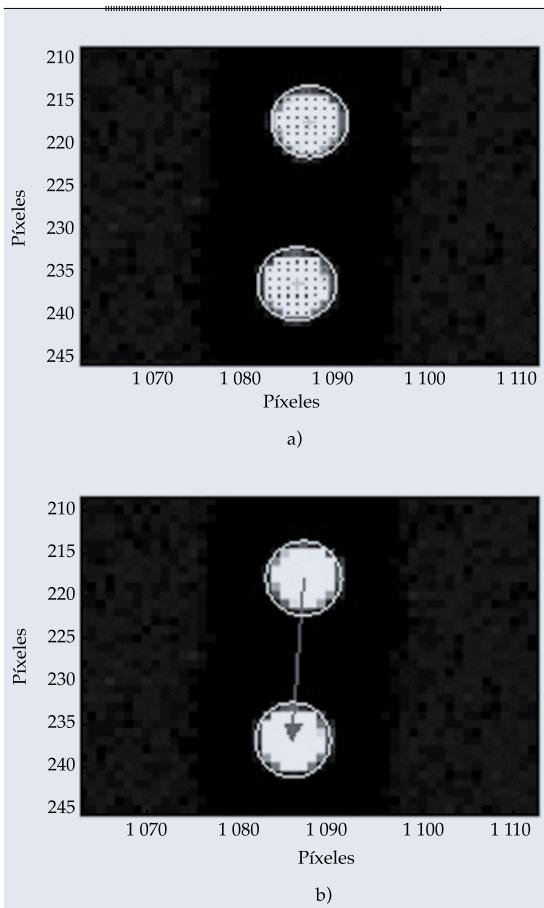


Figura 7. Detección de las gotas y vector velocidad:
a) determinación del centroide de las gotas; b) diámetro de las gotas y vector velocidad, partiendo del centroide de cada gota.

(figura 6a), con lo cual se integró un grupo de 1 582 gotas (658 gotas en H1, 448 gotas en H2 y 476 gotas en H3). La figura 6b muestra un acercamiento sobre una gota grabada en los dos tiempos consecutivos en una misma imagen. Una vez establecidas las imágenes con información válida, se someten al procesamiento para determinar en cada pulso el diámetro y centroide de la gota (figura 7a), además de calcular la velocidad a partir de la distancia recorrida (Δx , Δy) en el tiempo Δt (ecuación (1), figura 7b).

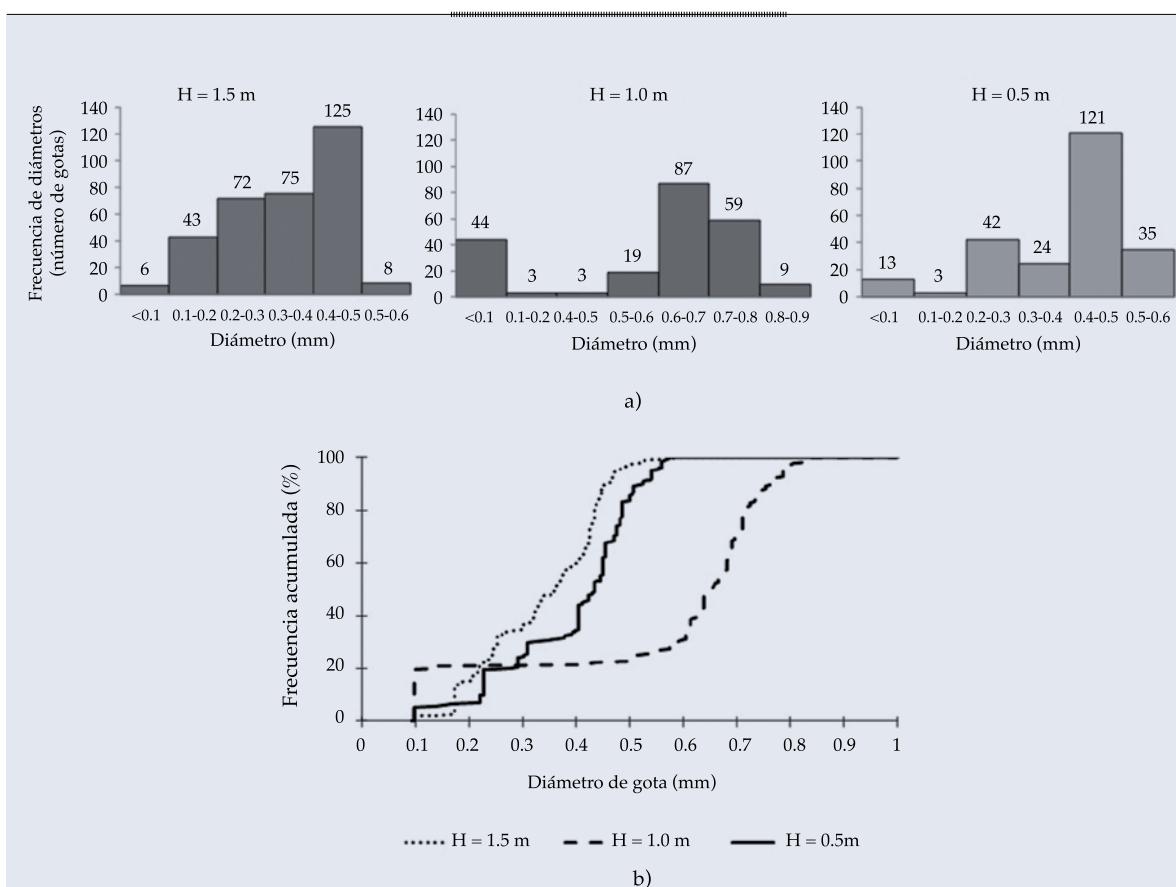
Cabe señalar que el tiempo de procesamiento fue de 4.2 s para determinar las características de cada gota, incluyendo su velocidad, lo que contrasta en importantes proporciones

con los resultados mostrados por Salvador *et al.* (2009) y Bautista *et al.* (2013), que indican un tiempo de caracterización de entre 4 y 7 minutos por gota.

Según se ha establecido, las imágenes fueron adquiridas a tres alturas a partir de la superficie del suelo, manteniendo constante la presión hidráulica y la distancia de observación; bajo estas condiciones y con el apoyo de las ecuaciones (2) a (5) se realizó el análisis estadístico, cuyos resultados se muestran en el cuadro 1. Respecto a los diámetros, se encontraron rangos de 0.10 a 0.58 mm, 0.10 a 0.83 mm y 0.09 a 0.59 mm para las alturas de 0.5, 1.0 y 1.5 m, respectivamente; los diámetros mínimos prácticamente son iguales, circunstancia que no prevalece en el caso de los diámetros máximos, pues se tiene un incremento del 30.12%, al pasar de 0.5 a 1.0 m, y una disminución del 28.92% cuando la altura de la cámara va de 1.0 a 1.5 m. Por otra parte, se observa que en el caso de D_v y D_{50} , los valores son iguales para H2 y H3, situación que no se presenta para H1, resultando para esta última que D_v fue 2.3% menor que D_{50} ; sin embargo, al comparar con el diámetro aritmético, las diferencias fueron mayores. Para las alturas de 0.5, 1.0 y 1.5 m, D_v y D_{50} fueron 17.0, 21.4 y 19.99% mayores que \bar{x} , respectivamente. Además, no fue posible establecer una relación entre la altura de la cámara y los distintos valores obtenidos para diámetro aritmético volumétrico y al 50% del volumen acumulado, ya que no se presentó una tendencia que indique que el diámetro aumenta o disminuye respecto a la posición vertical de la cámara, condición que difiere a lo reportado por Bautista *et al.* (2013), quienes encuentran variaciones en el diámetro de las gotas a diferentes alturas en un sistema de aspersión; esta discrepancia tal vez esté asociada con el dispositivo pulverizador utilizado en esta investigación. La figura 8a muestra la frecuencia para diámetros, los más detectados fueron de 0.4 a 0.5 mm (125 gotas), de 0.6 a 0.7 mm (87 gotas) y de 0.4 a 0.5 mm (121 gotas) para cada conjunto (H1, H2, H3), respectivamente. Los diámetros detectados en

Cuadro 1. Características de diámetros y velocidades obtenidos por altura de observación.

Variable	Parámetros	Altura de observación (m)		
		0.5	1.0	1.5
Diámetro (mm)	\bar{x}	0.39	0.55	0.34
	D_v	0.47	0.70	0.42
	D_{50}	0.47	0.70	0.43
	S	0.12	0.25	0.11
	CV	0.01	0.06	0.01
	D_{\min}	0.10	0.10	0.09
	D_{\max}	0.58	0.83	0.59
Velocidad (ms^{-1})	\bar{x}	4.02	3.70	3.63
	S	0.49	0.50	0.36
	CV	0.24	0.25	0.12
	V_{\min}	3.02	2.59	3.15
	V_{\max}	5.46	4.97	4.89

Figura 8. Comportamiento del diámetro de gotas para diferentes alturas: a) histogramas de frecuencia para diferentes alturas H ; b) frecuencia acumulada.

H2 son mayores en un 30.76% que los de H1 y H3. La figura 8b muestra la frecuencia acumulada para el diámetro de las gotas capturadas a las tres alturas. El comportamiento indica mayor cantidad de diámetros pequeños a 1.5 m de altura de la cámara, luego los que se obtuvieron a 0.5 m y finalmente los que se capturaron a 1.0 m. En general, el número de gotas de cierto diámetro entre las alturas de 0.5 y 1.5 m varía alrededor del 10% sin llegar a ser mayores de 0.6 mm. Esta condición no prevalece en el caso de aquellas que se obtuvieron a 1.0 m; en este caso, la frecuencia acumulada no supera el 20% para gotas que están entre 0.1 y 0.6 mm; sin embargo, a partir de este último diámetro, la tasa en la frecuencia acumulada es del orden de 32% por cada 0.1 mm de incremento en el diámetro de la gota, sin superar los 0.9 mm.

En el análisis estadístico de la velocidad de caída de las gotas (cuadro 1) se obtuvieron valores medios de 3.63, 3.70 y 4.02 ms^{-1} para H1, H2 y H3, respectivamente; con rangos para cada caso de 3.02 a 5.46 ms^{-1} ($S = 0.36 \text{ ms}^{-1}$), de 2.59 a 4.97 ms^{-1} ($S = 0.50 \text{ ms}^{-1}$) y de 3.15 a 4.89 ms^{-1} ($S = 0.49 \text{ ms}^{-1}$). Se observa un incremento de la velocidad media de las gotas conforme disminuye la altura de observación: 1.89% cuando se pasa de 1.5 a 1.0 m y 23.63% al ir de 1.0 a 0.5 m. La figura 9 ilustra la frecuencia de velocidades para las alturas de análisis; los rangos máximos detectados fueron de 3.7 a 3.8 ms^{-1} (53 gotas), de 3.5 a 3.7 ms^{-1} (26 gotas) y de 3.5 a 3.6 ms^{-1} (46 gotas) para las alturas de 1.5, 1.0 y 0.5 m, respectivamente. En este mismo sentido, fue posible construir el campo vectorial de velocidades con la información obtenida para cada partícula analizada; en la figura 10 se presenta el campo para los grupos H1, H2 y H3, en ella se observa la magnitud, dirección y sentido de las gotas incluidas. Contrastar estos mapas vectoriales resultó complicado, pues la literatura no reporta este tipo de información en estudios de fenómenos similares.

Resulta evidente que la gran mayoría de los vectores se desplaza en sentido vertical, situación que corresponde a la posición en que fueron capturadas las gotas; es decir, cuando

éstas van cayendo. Sin embargo, algunos de ellos (figura 10b) presentan una inclinación alrededor de 45°, hecho que se atribuye a la posición del pulverizador (30° respecto a la vertical), tal como los observan Salvador *et al.* (2009) y Bautista *et al.* (2009). Por otra parte, la relación diámetro-velocidad resulta fundamental en el estudio de la energía con la cual impactan las gotas sobre una superficie; la figura 11 muestra la correspondencia entre estas dos variables para las condiciones presión hidráulica-distancia de observación-alturas de observación. Cabe mencionar que algunos autores (Mang y Joss, 2000; Salvador *et al.*, 2009) han propuesto expresiones exponenciales y logarítmicas que explican la tendencia entre diámetro y velocidad; en este trabajo no fue posible encontrar una correlación entre tales variables debido a que se utilizó sólo un punto de observación desde el pulverizador, por lo que es necesario aplicar la técnica PTV a diferentes distancias para valorar dicha situación y más aún para diversas características del dispositivo que genera las gotas.

Conclusiones

Esta investigación reporta la aplicación de la técnica óptica de visualización de flujos PTV para caracterizar gotas generadas por un chorro que se pulveriza por efecto de altas presiones hidráulicas. Su implementación para el análisis de este tipo de fenómenos físicos resulta novedosa, pues su uso había sido en estudios sobre la velocidad de sedimentación de partículas no cohesivas. Una importante ventaja de esta metodología respecto a técnicas que utilizan fotografías de baja velocidad está relacionada con el tiempo necesario para la adquisición de imágenes con gotas válidas y con el requerido para su procesamiento. En el primer caso se optimiza en más del 200%, mientras que el segundo disminuye alrededor de ochenta veces por gota analizada. La aportación más significativa de este trabajo radica en la capacidad para obtener diámetros y velocidades (magnitud, dirección

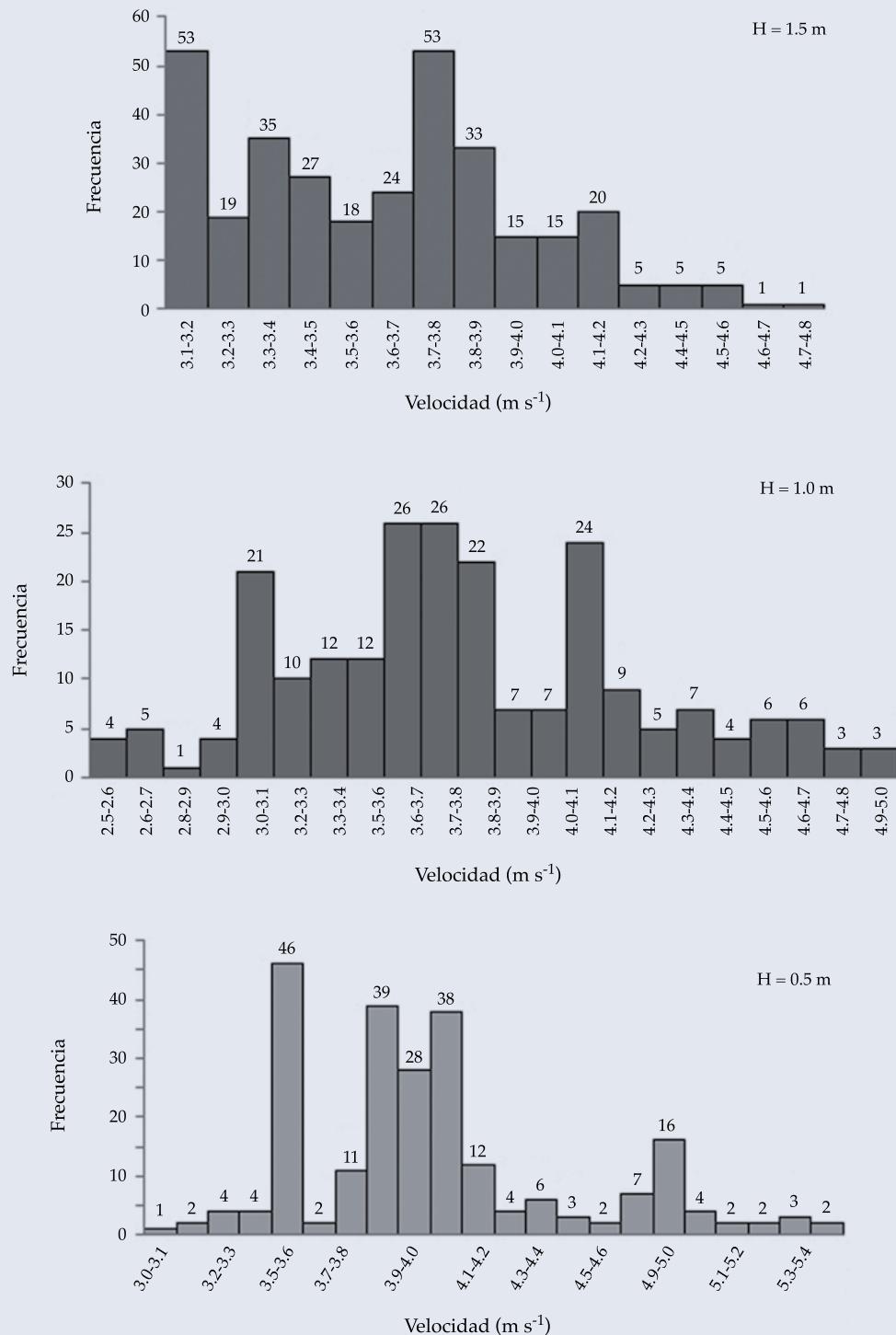


Figura 9. Histogramas de frecuencias de velocidad de las gotas para diferentes alturas.

y sentido) de un conjunto de gotas de forma automática, grabadas a 4.5 m del emisor para alturas de 0.5, 1.0 y 1.5 m, y presión hidráulica

de 175 kPa, lo que demuestra que la técnica se puede aplicar para el estudio futuro de las gotas generadas por un sistema de aspersión.

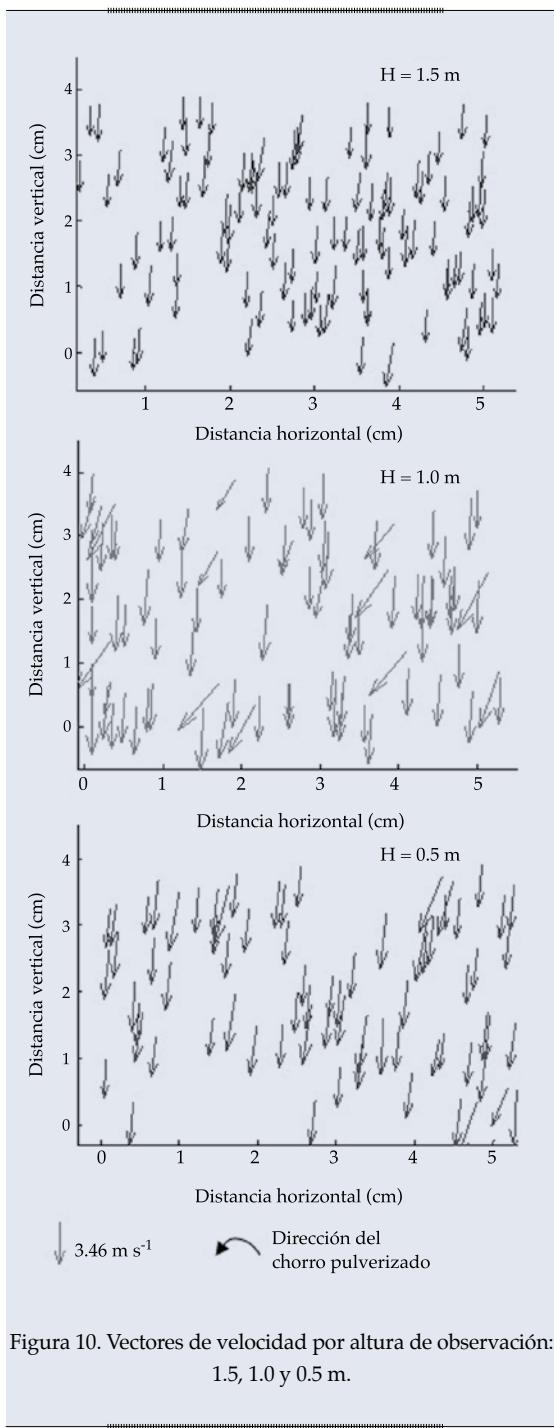


Figura 10. Vectores de velocidad por altura de observación: 1.5, 1.0 y 0.5 m.

Para las condiciones experimentales anteriores, se encontraron diámetros entre 0.09 y 0.83 mm, y velocidades que oscilan entre 2.5 y 5.5 ms^{-1} . Los valores medios para diámetro y velocidad fueron 0.39 mm, 4.02 ms^{-1} ; 0.55 mm, 3.70 ms^{-1} , y 0.34 mm, 3.63 ms^{-1} para las alturas de 0.5, 1.0 y 1.5 m, respectivamente. Los

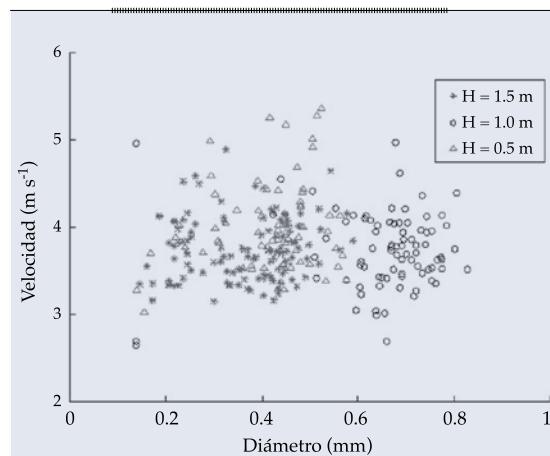


Figura 11. Relación de diámetros equivalentes contra velocidades resultantes

resultados de este trabajo derivan de un total de 1 685 imágenes adquiridas, de las cuales sólo 955 contenían gotas válidas, obteniendo así un total de 1 582 gotas analizadas que han permitido realizar la caracterización de diámetro y velocidad de las gotas. La propuesta estuvo encaminada a validar la técnica para su posterior utilización en la caracterización de las gotas generadas por sistemas de riego por aspersión, a fin de establecer relaciones diámetro-velocidad para diversas combinaciones de diámetro de boquilla, altura del aspersor, distancia de caída de las gotas, presión hidráulica de operación y condiciones ambientales.

Agradecimientos

Al Centro Interamericano de Recursos del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México y a la Maestría en Ingeniería Aplicada Orientación Recursos Hidráulicos de la Universidad Autónoma de Zacatecas. A Conacyt por la beca facilitada a Cruz Octavio Robles Rovelo en sus estudios de maestría. Esta investigación privilegia el concepto primer-último autor.

Recibido: 25/04/2013

Aceptado: 05/09/2013

Referencias

- ADRIAN, R.J. Engineering Applications of Particle Image Velocimeters. *Proc. SPIE* 1404, ICALEO'89, Optical Methods in Flow and Particle Diagnostics, October 01, Orlando, Florida, 1989, pp. 56-71.
- ADRIAN, R.J. Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Annual Reviews Inc., Fluid Mechanics*. Vol. XXIII. Urban, USA: Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois, 1991, pp. 261-304.
- BAUTISTA, C.F., SALVADOR, R., BURGUETE, J., MONTERO, J., TARJUELO, J.M., ZAPATA, N., GONZÁLEZ, J., and PLAYÁN, E. Comparing Methodologies for the Characterization of Water Drops Emitted by an Irrigation Sprinkler. *Transaction of the ASABE*. Vol. LII, No. 5, 2009, pp. 1493-1504.
- BAUTISTA, C.F., MÁRQUEZ, V.H., JÚNEZ, F.H. y PLAYÁN, E.J. Characterization of drops emitted by a two-nozzle impact sprinkler using a photographic technique. *Water Technology and Sciences*. Vol. IV, No. 5, 2013, pp. 147-164.
- CRUVINEL, P.E., MINATEL, E., MUCHERONI, M., VIEIRA, S., and CRESTANA, S. An Automatic Method Based on Image Processing for Measurements of Drop Size Distribution from Agricultural Sprinklers. *Anais do IX SIBIGRAPI*, São Paulo, Brazil, 1996, pp. 39-46.
- CRUVINEL, P.E., VIEIRA, S., CRESTANA, S., MINATEL, R., MUCHERONI, M., and NETO, A. Image Processing in Automated Measurements of Raindrop Size and Distribution. *Comput. Electron. Agric.* Vol. XXIII, No. 3, 1999, pp. 205-217.
- DECHMI, F. *Gestión del agua en sistemas de riego por aspersión en el valle de Ebro: análisis de la situación actual y simulación de escenarios*. Tesis doctoral. Zaragoza, España: Universidad de Lleida, diciembre de 2002.
- EIGEL, J.D. and MOORE, I.D. A Simplified Technique for Measuring Raindrop Size and Distribution. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* Vol. XXVI, No. 4, 1983, pp. 1079-1084.
- FLORES, G.L. y LÓPEZ, R.B. *Análisis hidrodinámico de un sistema de recirculación de agua para uso en acuacultura utilizando técnicas óptimas PIV y PTV*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. Toluca, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, 2012.
- HAUSER, D., AMAYENC, P., NUTTEN, B., and WALDTEUFEL, P. A New Optical Instrument for Simultaneous Measurement of Raindrop Diameter and Fall Speed Distributions. *J. at Ocean. Technol.* Vol. I, No. 3, 1984, pp. 256-269.
- IDO, T., MURAI, Y., and YAMAMOTO, F. Post-Processing Algorithm for Particle-Tracking Velocimetry Based on Ellipsoidal Equations. *Exp. Fluids*. Vol. 32, 2002, pp. 326-336.
- JENSEN, K.D. Flow Measurements. *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.* Vol. XXVI, 2004, pp. 400-419.
- JONES, D.M. *Rainfall Drop-Size Distribution and Radar Reflectivity*. Fort Monmouth, New Jersey: Illinois State Water Survey, Meteorology Laboratory, Research Report No. 6, 1956, pp. 20.
- KINCAID, D.C., SOLOMON, K.H., and OLIPHANT, J.C. Drop Size Distributions for Irrigation Sprinklers. *Trans. of ASAE*. Vol. XXXIX, No. 3, 1996, pp. 839-845.
- KOHIL, R.A. and DeBOER, D.W. Drop Size Distributions for a Low Pressure Spray Type Agricultural Sprinkler. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* Vol. XXVII, No. 6, 1984, pp. 1836-1840.
- MAGARVEY, R.H. Stain Method of Drop Size Determination. *J. Meteorol.* Vol. XIV, 1956, pp. 182-184.
- MANG, M.L. and JOSS, J. An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors. *J. at Ocean. Technol.* Vol. XVII, 2000, pp. 130-139.
- MONTERO, J., TARJUELO, J.M., and CARRIÓN, P. Sprinkler Droplet Size Distribution Measured with an Optical Spectropluviometer. *Irrigation Sci.* Vol. I, No. 22, 2003, pp. 47-56.
- PLAYÁN, E., ZAPATA, N., FACI, J.M., TOLOSA, D., LACUEVA, J.L., PELEGÓN, J., SALVADOR, R., SÁNCHEZ, I., and LAFITA, A. Assessing Sprinkler Irrigation Uniformity using a Ballistic Simulation Model. *Agric. Water Manag.* Vol. LXXXIV, No. 1-2, 2006, pp. 89-100.
- PRASAD, A.K. Particle Image Velocimetry. *Exp. Fluids*. Vol. LXXIX, No. 1, 2000, pp. 51.
- RAFFEL, M., WILLERT, C.E., and KOMPENHANS, J. *Particle Image Velocimetry*. New York: Ed. Springer, 1998.
- SALLES, C., POESEN, J., and BORSELLI, L. Measurement of Simulated Drop Size Distribution with an Optical Spectro-Pluviometer: Sample Size Considerations. *Earth Surface Processes Landforms*. Vol. XXIV, No. 6, 1999, pp. 545-556.
- SALINAS, T.H., GARCÍA, A.J., MORENO, H.D., and BARRIENTOS, G.B. Particle Tracking Velocimetry (PTV) Algorithm for Non-Uniform and Non-Spherical Particles. *Proceedings, Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, CERMA. Núm. 2, Cuernavaca, Morelos, México, del 26 al 29 de septiembre de 2006, pp. 322-327.
- SALINAS, T.H. y GARCÍA, A.J. Experimental formula for the settling velocity of sediments in cross-flow. *Water Technology and Sciences* therefore Hydraulic Engineer in Mexico. Vol. II, No. 2, 2011, pp. 175-182.
- SALVADOR, R., BAUTISTA, C., BURGUETE, J., ZAPATA, N., SERRETA, A., and PLAYÁN, E. A Photographic Method for Drop Characterization in Agricultural Sprinklers. *Irrigation Sci.* Vol. XXVII, February, 2009, pp. 307-317.
- SANG, Y.L. and YU, D.K. Sizing of Spray Particles using Image Processing Technique. *KSME International Journal*. Vol. XVIII, No. 6, 2004, pp. 879-894.
- SMITS A.J. and LIM T.T. *Flow Visualization: Techniques and Examples*. Singapore: Ed. Imperial College Press, 2000, 396 pp.

- SUDHEER, K.P. and PANDA, R.K. Digital Image Processing for Determining Drop Sizes from Irrigation Spray Nozzles. *Agric. Water Manag.* Vol. XLV, 2000, pp. 159-167.
- VAN DYKE, M. *An Album of Fluid Motion*. Stanford: Ed. Parabolic Press, 1982, 176 pp.
- VIRANT, M. and DRACOS, T. 3D PTV and Application on Lagrangian Motion. *Meas. Sci. Technol.* Vol. 8, 1997, pp. 1539-1552.
- VORIES, E.D., VON BERNUTH, R.D., and MICKELSON, R.H. Simulating Sprinkler Performance In Wind. *J. Irrig. and Drainage Div. ASCE*. Vol. CXIII, No. 1, 1987, pp. 119-130.
- WESTERWEE, J. *Digital Particle Image Velocimetry. Theory and Application*. Ph. D. Thesis. Delft: University of Technology, the Netherlands, 1993.

Dirección institucional de los autores

Dr. Humberto Salinas Tapia

Profesor-investigador del CIRA

Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA)

Universidad Autónoma del Estado de México

Carretera Toluca-Ixtlahuaca, km 14.5

San Cayetano de Morelos

50295 Toluca, Estado de México, México

Teléfono: +52 (722) 2965 550 y 51 / 180 6191 y 92,

extensión 103

hsalinast@uaemex.mx

M.I. Cruz Octavio Robles Rovelo

M.I. Dagoberto Chávez Carlos

Dr. Carlos Francisco Bautista Capetillo

Universidad Autónoma de Zacatecas

Av. Ramón López Velarde 801, Col. Centro

98000 Zacatecas, Zacatecas, México

Teléfono: +52 (492) 9222 001

corr03@hotmail.com

dago_chc@hotmail.com

baucap@uaz.edu.mx