

# Criterios hidrodinámicos para el diseño de sistemas de recirculación en acuicultura

• Juan A. García-Aragón\* • Humberto Salinas-Tapia • Víctor Díaz-Palomarez •  
• Boris M. López-Rebollar • Javier Moreno-Guevara •  
• Leonarda M. Flores-Gutiérrez •

Universidad Autónoma del Estado de México

\*Autor de correspondencia

## Resumen

García-Aragón, J. A., Salinas-Tapia, H., Díaz-Palomarez, V., López-Rebollar, B. M., Moreno-Guevara, J., & Flores-Gutiérrez, L. M. (septiembre-octubre, 2014). Criterios hidrodinámicos para el diseño de sistemas de recirculación en acuicultura. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 63-76.

Con el objetivo de hacer más eficiente el uso del agua se ha desarrollado la técnica de sistemas cerrados de recirculación de agua (SRA) para acuicultura. Un aspecto que se ha relegado, en cuanto a los estudios de calidad de agua y biológicos, es el relativo a la hidrodinámica de esos tanques de recirculación. En este trabajo se describe una investigación experimental llevada a cabo en un modelo en plexiglass a escala reducida de dichos tanques de recirculación. En un tanque circular se utilizó comida para peces, los flóculos resultantes sirvieron de trazadores para establecer las características de sedimentación. Por medio de técnicas ópticas, velocimetría por imágenes de partículas (PIV), se pudo determinar una distribución óptima de difusores para lograr diferentes velocidades en el tanque a fin de facilitar los procesos de floculación y, a su vez, los de sedimentación. Igualmente se propone un diseño del sedimentador central en función de las características de los flóculos y de su comportamiento hidrodinámico, en especial su velocidad de caída. Para calcular las velocidades de caída de los flóculos se utilizó la técnica de velocimetría por rastreo de partículas (PTV). Los resultados experimentales permitieron calibrar un modelo matemático de velocidades de caída de flóculos.

**Palabras clave:** acuicultura, SRA, flóculos, PIV, PTV, velocidades de caída.

## Abstract

García-Aragón, J. A., Salinas-Tapia, H., Díaz-Palomarez, V., López-Rebollar, B. M., Moreno-Guevara, J., & Flores-Gutiérrez, L. M. (September-October, 2014). Hydrodynamic Criteria to Design Water Recirculation Systems for Aquaculture. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 63-76.

Closed water recirculation systems (WRS) have been developed for aquaculture in order to more efficiently use water. In terms of water quality and biological studies, the hydrodynamics of recirculation tanks is an aspect that has been least studied. The work herein describes an experimental investigation carried out with a reduced-scale plexiglass model of these tanks. Fish food was used in one tank in which the resulting flocs served as tracers to determine sedimentation characteristics. Using optical techniques  $\frac{3}{4}$ particle image velocimetry (PIV) $\frac{3}{4}$  it was possible to determine the optimal distribution of diffusers to obtain different velocities in the tank in order to facilitate the flocculation and sedimentation processes. A design for a central settling basin is also proposed based on the characterization of the flocs and their hydrodynamic behavior, particularly the fall velocity. Particle trace velocimetry (PTV) was used to calculate the fall velocity of the flocs. The experimental results enabled calibrating a mathematical model for fall velocities of flocs.

**Keywords:** aquaculture, WRS, flocs, PIV, PTV, settling velocity.

---

Recibido: 07/11/12  
Aceptado: 29/01/14

---

## Introducción

Una alternativa para el cultivo de peces en zonas con escasez de agua es el uso de sistemas cerrados de recirculación de agua SRA (Wheaton, 1977),

cuya característica principal es el reúso y ahorro del vital líquido. Estos sistemas están equipados con una serie de módulos de tratamiento de aguas para mantener su calidad en niveles adecuados para su reúso y supervivencia de

los peces (Wheaton, 1977; Gallego-Alarcón, 2010). Si bien se ha podido reducir el uso de grandes volúmenes de agua con los SRA, la mayoría de los estudios se enfoca en la calidad del agua y en las condiciones de supervivencia de los peces desde el punto de vista biológico (Gallego-Alarcón, 2010) y se ha descuidado el estudio hidrodinámico de los tanques de cultivo (tanques de recirculación). Estos son la unidad principal para el desarrollo de los peces y la sedimentación de sólidos, producto de las excretas de los peces y del alimento no consumido, provocando contaminación del agua con niveles altos de nitritos y nitratos.

El principal problema que presentan los tanques de recirculación en acuicultura es la baja eficiencia en la remoción de sólidos en suspensión debido a que tienen tamaños menores a los 70 micrones, por lo cual se consideran sedimentos cohesivos (Droppo, 2001) y sólo sedimentan al agregarse. Para su pronta sedimentación, los sedimentos cohesivos deben formar flóculos o agregados compuestos de una matriz de agua, partículas inorgánicas y partículas orgánicas (Droppo & Ongley, 1994; Nicholas & Walling, 1996; Droppo, 2005), la cual depende de la velocidad de caída, siendo éste un campo abierto de investigación (García-Aragón, Droppo, Krishnappan, Trapp, & Jaskot, 2011), donde se consideren los factores que afectan la sedimentación de los flóculos, incluyendo su caracterización. Para ello es importante aplicar métodos no invasivos, que permitan identificar criterios para diseñar tanques de sedimentación con características de auto-limpieza. En la literatura científica no hay acuerdo sobre criterios de diseño adecuados para una eficiente remoción de flóculos en tanques de recirculación para acuicultura, de ahí la importancia del presente trabajo.

Los tanques más utilizados son los circulares (Watten & Beck 1987; **Summerfeld, Wilton, Roberts, Rimmer, & Fonkalsrud, 2004**) (OJO AUTOR, EN REFERENCIAS SE TIENE SUMMERFELT, NO SUMMERFELD, ¿CUÁL ES EL APELLIDO CORRECTO?). La alimentación de agua a esos tanques es

por medio de difusores adheridos a la pared exterior, con la finalidad de controlar las velocidades medias tanto en la vertical como en la transversal al tanque. La adecuada disposición de los difusores permite seleccionar la velocidad de confort del pez y, a su vez, procurar condiciones idóneas de sedimentación de partículas.

La importancia del estudio hidrodinámico en este tipo de sistemas consiste en definir las condiciones hidráulicas, principalmente las condiciones de entrada y salida del flujo, condiciones que afectan la velocidad de recirculación del agua y debido al perfil de velocidad en la vertical la sedimentación de partículas. Si se controlan de forma adecuada estos parámetros, se puede lograr una distribución homogénea de peces que, en consecuencia, garantice el uso óptimo del volumen de agua (Duarte, Reig, Oca, & Flos, 2004) y la rápida sedimentación de los sólidos suspendidos. Además, determinando la hidrodinámica, se puede optimar la remoción de sólidos de forma natural (por sedimentación). Sin embargo, de manera experimental es complicado determinar estas condiciones con métodos invasivos, siendo necesaria la aplicación de técnicas no invasivas que permitan determinar de forma conjunta la velocidad del fluido y la velocidad de sedimentación de las partículas, sin afectar el comportamiento del flujo.

En el estudio del movimiento de fluidos en 2D se utilizan las técnicas ópticas de velocimetría por imágenes de partículas (Particle Image Velocimetry, PIV) y de velocimetría por rastreo de partículas (Particle Tracking Velocimetry, PTV) (Adrian, 1991; Salinas, 2007; Salinas-Tapia & García-Aragón, 2011), como técnicas no invasivas. Estas técnicas permiten determinar campos de velocidad de flujos en forma instantánea por medio del procesamiento de una imagen óptica grabada en dos tiempos sucesivos muy cortos. Una de las características principales de las técnicas es que utilizan partículas trazadoras para describir los patrones del flujo; por lo

tanto, con su aplicación es posible entender mejor el comportamiento hidrodinámico. Una hidrodinámica adecuada permite diseñar tanques de recirculación con características de auto limpieza y eficiencia en sedimentación de partículas.

En este estudio se determinaron los campos de velocidad del fluido y de las partículas sólidas con la aplicación de las técnicas ópticas PIV y PTV. Los datos experimentales obtenidos son valiosos científicamente, puesto que hacen falta este tipo de datos para el estudio de fases dispersas como se enfatiza en la revisión de **Sundarasan, Eaton, Koch y Ottino (2003) (OJO AUTOR, EN REFERENCIAS SE TIENE SUNDARESAN, NO SUNDARESEN, ¿CUÁL ES EL APELLIDO CORRECTO?)**. Esos datos permitieron determinar las características de diseño de los difusores y del sedimentador que mejor se adaptan para la remoción de partículas sólidas, así como proponer un modelo para determinar la velocidad de caída de flóculos formados por sedimentos cohesivos propios de tanques de acuicultura.

Se cuenta con experiencia en el manejo de las técnicas PIV y PTV (Salinas-Tapia & García-Aragón, 2011) en determinar la velocidad de caída (sedimentación) de partículas no cohesivas. Por lo tanto, en el presente proyecto se utilizó la técnica de PIV y PTV para determinar el campo de velocidades del fluido para diferentes configuraciones de difusores y la de PTV para determinar las velocidades de sedimentación de los flóculos.

### Disposición experimental

El desarrollo de este trabajo se realizó en un modelo a escala reducida de un tanque de recirculación circular, utilizando como criterios hidrodinámicos el análisis de diferentes configuraciones de difusores (entrada de flujo) para seleccionar la más adecuada y con una alta eficiencia de remoción de sólidos del tanque. Este criterio se utilizó en combinación con el análisis del dispositivo de salida de flujo y del sedimentador central. El sedimentador

consiste en dos tubos concéntricos en el centro del tanque que funcionan de acuerdo con el principio de hidrociclones (Timmons, Summerfeld, & Vinci, 1998). El tubo externo tiene ranuras en la parte inferior, las cuales permiten la entrada de agua y sedimento. El agua que ingresa por el tubo exterior asciende hasta alcanzar la máxima altura del tubo interior, el cual funciona como un vertedor que controla el tirante y está conectado con el sistema de salida. Por otro lado, en el espacio entre ambos tubos se genera una zona de baja velocidad, lo cual permite la sedimentación de los flóculos.

Para el modelo a escala se utilizó como referencia el sistema piloto de cultivo de peces instalado en el laboratorio de modelos hidráulicos del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), el cual está diseñado a escala real para el cultivo de peces, con dimensiones de 3 m de diámetro y 1.0 m de altura, construido de mampostería, con tirantes de agua de 0.90 cm, y velocidades máximas de 30 cm/s.

La principal problemática encontrada en este tipo de tanques de cultivo es la poca eficiencia en la sedimentación de las partículas (Gallego-Alarcón, 2010), la eficiencia alcanzada por el sedimentador fue de 5.56%, muy por debajo de la reportada por investigaciones anteriores (García, 2008; Gallego-Alarcón, García, Díaz, & Fall, 2004; Gallego-Alarcón, 2004). Esta problemática justifica la evaluación de la hidrodinámica del sistema, factor importante en la sedimentación de las partículas, utilizando como criterio principal la selección y configuración de los dispositivos de entrada y salida del flujo.

Para evaluar y determinar las configuraciones correctas de entrada y salida de flujo, utilizando las técnicas de PIV y PTV, fue necesario construir un sistema a escala, aplicando las leyes de similitud dinámica y cinemática. El principal criterio utilizado para transferir los resultados de los estudios hidrodinámicos de un modelo a un prototipo es el número de Reynolds  $\left(Re = \frac{uh}{\nu}\right)$  y el

número de Froude  $\left(Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}\right)$ . En el cuadro 1 se resumen las propiedades geométricas, así como los parámetros hidrodinámicos del prototipo y las correspondientes al modelo utilizado para este trabajo.

Como resultado de la similitud geométrica se tiene que las escalas obtenidas son escala de longitud,  $l_e = 3.0$ , y escala de velocidad,  $v_e = \sqrt{3.0} = 1.73$ . Es decir, que para obtener las velocidades del modelo, se necesitan dividir por 1.73 las velocidades medidas en el prototipo.

## Metodología

El arreglo experimental empleado en el desarrollo de la presente investigación después de aplicar análisis dimensional al prototipo instalado en el CIRA consta de un tanque con recirculación de agua de 1.03 m de diámetro y 40 cm de altura, elaborado con plexiglás para permitir una visualización adecuada. La alimentación es por gravedad a través de los arreglos de difusores de acuerdo con tres configuraciones propuestas para evaluar la

hidrodinámica del flujo, los difusores son intercambiables, lo que permite controlar el caudal y dirección, lo cual permitió analizar el comportamiento del flujo (ver figura 1). Para este trabajo se consideró como criterio hidrodinámico tres configuraciones diferentes de difusores, correspondiente a tres caudales líquidos distintos, además se determinó la velocidad media ( $u_{med}$ ) del flujo utilizando un molinete digital con precisión de 0.1 cm/s, y con estos datos se determinó el número de Reynolds  $\left(Re = \frac{uh}{\nu}\right)$  y el número de Froude  $\left(Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}\right)$ . En el cuadro 2 se presentan los parámetros hidráulicos utilizados.

Otro criterio considerado en la hidrodinámica del tanque que de acuerdo con los resultados previos es importante en este tipo de sistemas es la selección de los dispositivos de salida de flujo, ello con la finalidad de diseñar sistemas con características de auto limpieza.

Para lograr una velocidad constante y un flujo uniforme en el sistema, la alimentación se realiza por medio de dos trenes de difusores de diámetro variable (figura 2), instalados de tal forma que se puede controlar la dirección

Cuadro 1. Parámetros del modelo y prototipo del tanque de recirculación.

Parámetros	Prototipo	Modelo
Material de construcción	Mamostería, acabado de cemento	Acrílico
Fluido	Agua	Agua
Temperatura del agua (°C)	13° - 17°	15° - 17°
Diámetro del tanque, $D$ (cm)	300	100
Altura del tanque, $H$ (cm)	100	35
Diámetro del hidrociclón (cm)	85	30
Distancia radial (ancho del canal) desde la pared del tanque a la pared del hidrociclón (cm)	93	35

Cuadro 2. Distribución y tamaño de difusores.

Configuración	Diámetro del difusor (mm)	Dirección del difusor (°)					Q (l/min)
		1	2	3	4	5	
A	4.37	45	135	45	45	90	14.62
B	3.18	45	30	45	90	135	9.00
C	3.18 y 1.08	45	45	135	90	135	10.91

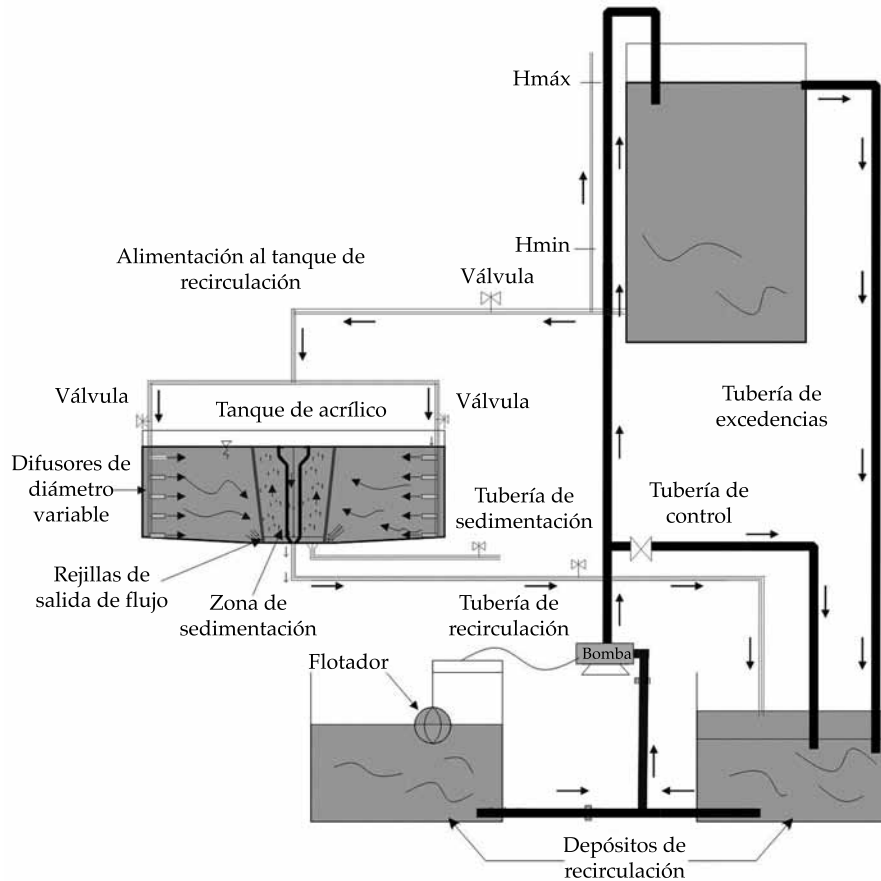


Figura 1. Disposición experimental.

del flujo de entrada. Para determinar las condiciones de flujo se varió la dirección de los difusores creando zonas de más alta o más baja velocidad, según se requiriera para hacer más eficiente la remoción de los sólidos. Las configuraciones de los difusores que se privilegiaron en el presente estudio fueron tres y los datos de configuración se muestran en el cuadro 2. Cada tren consiste en cinco difusores, donde los ángulos de dirección son medidos a partir de la tangente de la pared del tanque, siendo ésta la referencia  $0^\circ$  y midiendo los ángulos en el sentido de las manecillas del reloj (figura 2). En la figura 2b se puede apreciar cómo están distribuidos los difusores que generan un flujo circular en el canal.

Como dispositivo de salida se utilizó el principio de hidrociclón (Timmons *et al.*,

1998), con una modificación que permite la sedimentación de partículas. Este dispositivo consistió en dos tubos concéntricos en la parte central del tanque, donde el tubo exterior es de 30 cm de diámetro y 35 cm de altura, el cual presenta ranuras perimetrales en la parte inferior, para permitir la entrada de agua, y que ésta ascienda hasta el tubo interior de 10 cm de diámetro y 30 cm de altura; este último conectado a una tubería de salida para su recirculación (figura 2a).

Para la instalación del sistema óptico (PIV), se utilizó una fuente de luz láser Nd:YAG de doble cavidad (doble pulsado) de 15 mJ; este equipo permitió iluminar la región de análisis (10 x 10 cm). Para la captura de imágenes se utilizó una cámara con sensor CCD de marca Lumenera (60 fps) y una cámara con sensor CCD

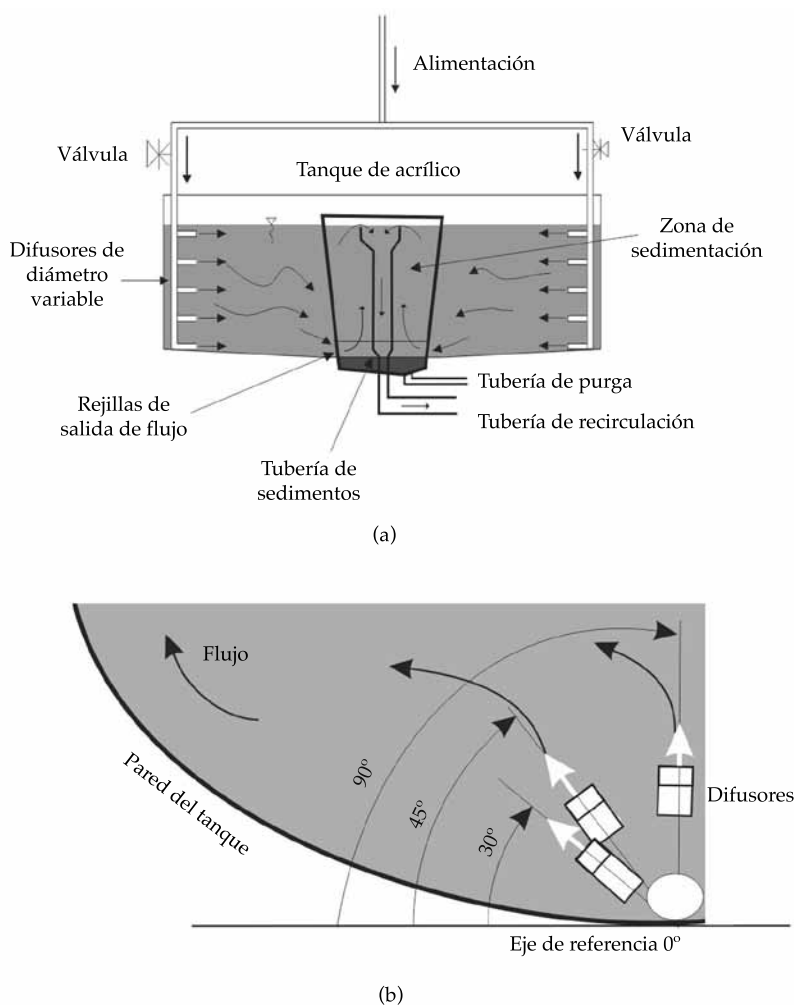


Figura 2. Ubicación de los difusores de alimentación: a) dirección de difusores, b) posición de difusores.

de marca JAI (250 fps), equipadas con un lente Nikon 50 mm, las cuales fueron sincronizadas con la fuente de luz láser, utilizando la tarjeta de sincronización NI-PCIE-1430 de National Instruments.

El desarrollo experimental consistió en dos etapas. La primera fue el desarrollo de experimentos para determinar el comportamiento hidrodinámico del tanque, donde se evaluaron las diferentes configuraciones de entrada y salida de flujo. Se utilizaron tres diferentes caudales, tomado como referencia el rango de velocidades apropiadas para el adecuado crecimiento de los peces (Gallego-Alarcón, 2010), seleccionando aquella que presentó mejores

condiciones de sedimentación de partículas. La segunda etapa consistió en determinar el comportamiento de los sedimentos que por su origen se consideran como cohesivos, para ello se determinó la velocidad de sedimentación. En esta etapa se utilizaron como sedimentos cohesivos alimento para peces empleado en tanques de acuicultura, el cual fue caracterizado, obteniendo su granulometría.

Los campos de velocidad fueron obtenidos aplicando la técnica PIV y PTV, asimismo, se calcularon los perfiles de velocidad para analizar el comportamiento del flujo, aplicando el análisis estadístico descrito en Salinas (2007). Los experimentos se realizaron considerando

condiciones de flujo uniforme, empleando agua a 15 °C (viscosidad cinemática de  $1 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s) como fluido. Para eliminar impurezas, se utilizó un filtro que retiene partículas mayores a 5 µm, las cuales pudieran interferir en el procesamiento de las imágenes, en vista de que se emplearon partículas trazadoras de PSP poliamida de 25 µm de diámetro y densidad de 1.03 g/cm<sup>3</sup>. Mientras que para los sedimentos se utilizó alimento para peces, el cual se tamizó para obtener tamaños de partículas menores a 75 micrones, a fin de provocar la formación de flóculos y determinar su velocidad de caída.

Para determinar los campos de velocidad tanto del fluido como de los sedimentos, se adquirieron en promedio 100 imágenes por corrida con tres repeticiones por cada configuración del sistema de entrada y salida del flujo (configuraciones A, B y C), de una zona iluminada por la hoja de luz láser.

En la configuraciones A y B, ambos trenes de difusores se encontraban en lados opuestos del tanque (como en la figura 2a) y tenían el mismo diámetro; en la configuración C, los dos trenes de difusores se encontraban en el mismo lado del tanque de forma paralela; en un tren, el diámetro del difusor fue de 3.18 mm y en el otro de 1.98 mm.

Como se puede observar de las configuraciones, los difusores en la parte superior del tanque tienen direcciones de 45° o menores, con el objetivo de obtener mayores velocidades en esa zona del tanque y facilitar los procesos de floculación por velocidad diferencial. Los de la parte inferior, por el contrario, tienen ángulos de 90° o mayores, con el objetivo de reducir la velocidad en esa zona del tanque y acelerar los procesos de sedimentación.

El procesamiento de imágenes se realizó aplicando PIV, con el *software SwPIV* para la hidrodinámica del tanque, mientras que para determinar la velocidad de caída de las partículas sedimentarias se aplicó PTV, con el *software PTVsed V.1.0*, desarrollado para caracterizar partículas no esféricas y no uniformes (Salinas-Tapia, García-Aragón, Moreno, & Barrientos, 2006).

Para calcular la velocidad de caída de los flóculos se utilizó la técnica de velocimetría por rastreo de partículas (PTV), técnica ideal para determinar la velocidad de partículas dispersas en un sistema bifásico (Salinas, 2007). Para obtener la velocidad de los flóculos y del fluido fue necesario adicionar al flujo partículas trazadoras de diferente densidad a la fase dispersa, generando así un desafío para la determinación de la velocidad de las diferentes fases (Chetverikov, Nagy & Verestóy, 2000; **Guastu, Haung, & Breuer, 2005 (OJO AUTOR, EN REFERENCIAS SE TIENE GUASTO, NO GUASTU, ¿CUÁL ES EL APELLIDO CORRECTO?)**; Udrea, Bryanston-Cross, Lee, & Funes-Gallanzi, 1996). Además, cuando se trata de un sistema sólido-líquido (transporte de sedimentos), el problema es aún mayor, ya que no existe uniformidad en las partículas en su forma y diámetro, produciendo que el comportamiento sea más complejo a un flujo bifásico convencional.

## Resultados

El análisis de los resultados consistió en la determinación de las velocidades de caída de los flóculos y las condiciones hidrodinámicas para que esto suceda. Igualmente se determinarán las condiciones hidrodinámicas que favorecen la remoción de sólidos. Para éstas se determinaron las características físicas óptimas del sedimentador, a fin de cumplir con la función de permitir concentraciones de sólidos adecuadas para el desarrollo de peces.

Como resultado de la aplicación de la técnica PIV se obtuvieron los campos de velocidad en 2D para cada configuración de entrada de flujo. En la figura 3 se muestran sólo los campos de velocidad correspondientes a la configuración C, la cual presentó el mejor comportamiento hidrodinámico, ya que como se observa existe una distribución variable de velocidades en todo el ancho y alto del tanque. En esta configuración C se obtuvo una velocidad máxima de 11.05 cm/s en la pared del tanque a una altura de 15 cm y una velocidad mínima

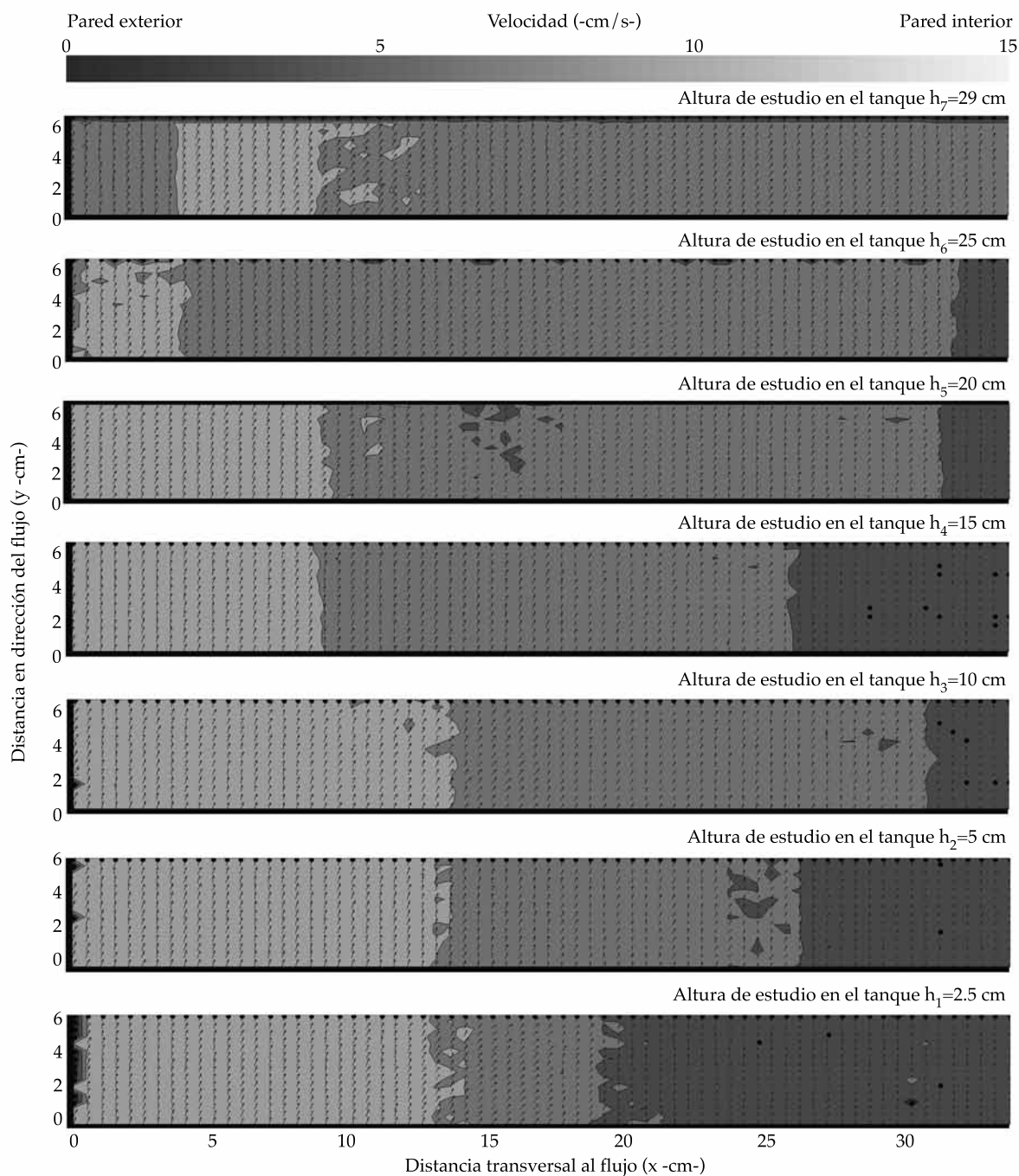


Figura 3. Campos de velocidad para la configuración C.

de 3.75 cm/s cerca del tubo del hidrociclón exterior a una altura de 15 cm. Esto permite acelerar los contactos entre partículas en la parte alta del tanque y permite las condiciones idóneas de sedimentación de partículas en la parte baja del tanque. Este comportamiento no

se logró con las configuraciones A y B.

Por otro lado, en la figura 4 se muestra una comparación de los perfiles de velocidad obtenidos para las configuraciones A, B y C. Los perfiles mostrados indican que la velocidad en el tanque es variable, lo cual no es tomado en



cuenta durante el diseño convencional de un tanque. Esto depende de la configuración de los dispositivos de entrada de flujo, principalmente de la dirección de inyección del flujo. Este análisis espacial en 2D permitió establecer los criterios a considerar en la hidrodinámica de los tanques, los cuales son de importancia para que las partículas puedan lograr una sedimentación eficiente y condiciones óptimas para el cultivo de peces. La clave del éxito es la distribución e instalación de los dispositivos de entrada y salida de flujo. Como se observa en la figura 4, es esencial establecer la dirección y diámetro de los difusores para garantizar las condiciones con alta tasa de sedimentación, pero no descuidando las condiciones óptimas para un adecuado desarrollo de los peces de acuerdo con su tamaño (Gallego-Alarcón, 2010).

Un elemento importante en el diseño de los tanques, que permitan la sedimentación de partículas, es el tubo exterior central.

El diámetro del tubo exterior central ( $D_{tc}$ ) depende del caudal suministrado  $Q$  y de las características de los sedimentos que se requiere remover, en especial de la velocidad de caída de éstos ( $W_s$ ). La velocidad de ascenso en el sedimentador debe ser menor a la velocidad de caída de los sedimentos. Si el sedimentador central se compone de un tubo exterior y de un tubo interior de radio ( $D_{tc}/3$ ), se debe cumplir lo siguiente:

$$V_{as} = \frac{Q}{\pi \frac{D_{tc}^2}{4} - \pi \left(\frac{D_{tc}}{3}\right)^2} \quad (1)$$

Si  $V_{as} < W_s$ , entonces se debe cumplir que:

$$D_{tc} > 1.19 \sqrt{\frac{Q}{W_s}} \quad (2)$$

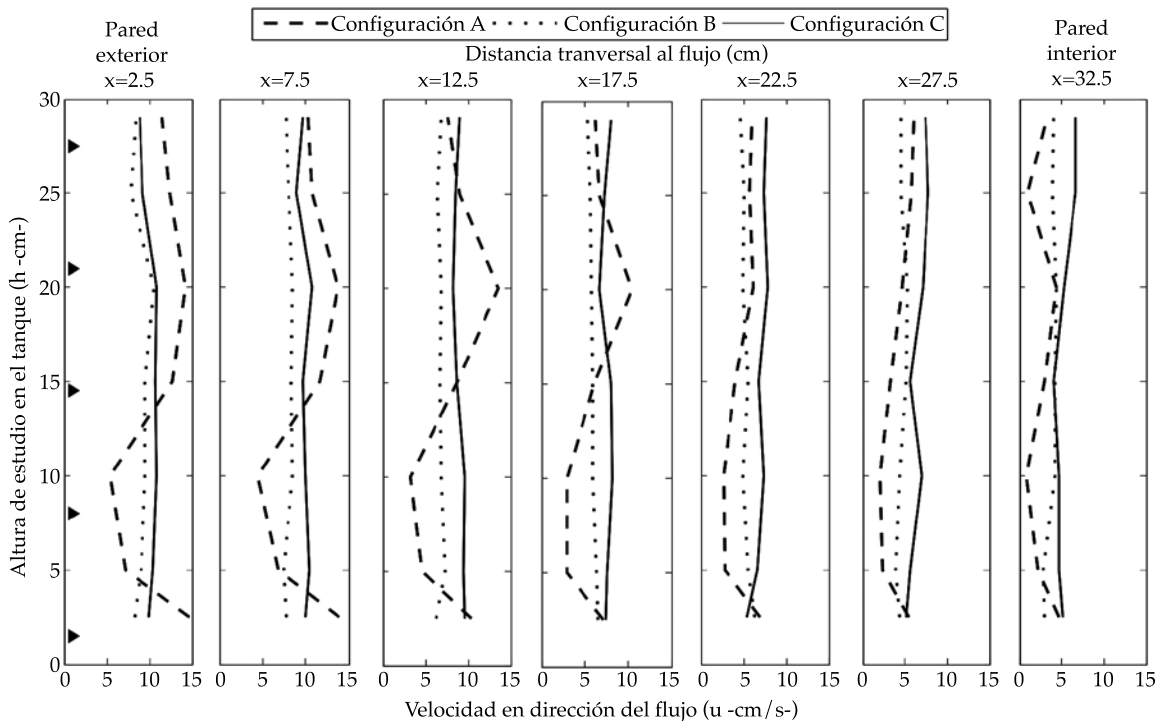
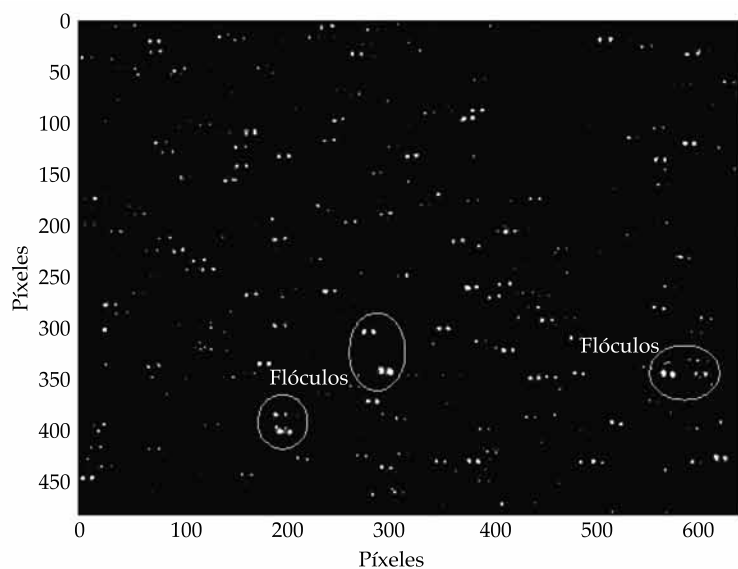


Figura 4. Comparación de los perfiles de velocidad para las distintas configuraciones (A, B y C), y a diferentes distancias en dirección transversal al flujo.

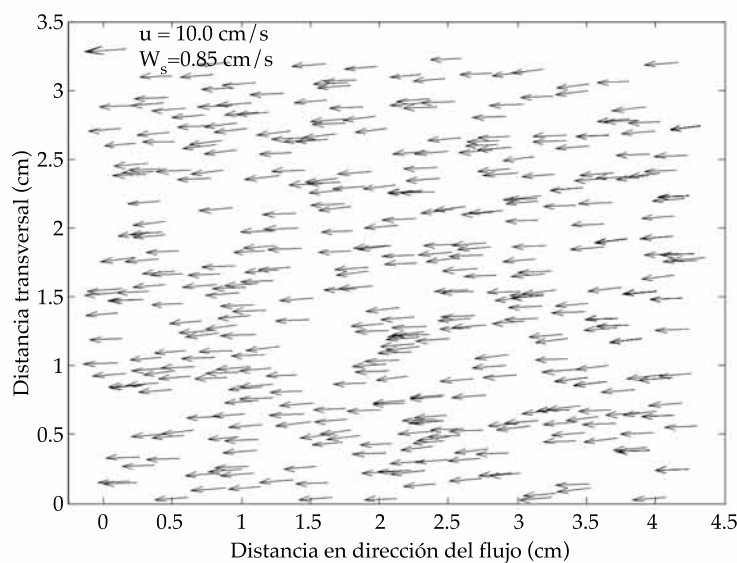
La dificultad mayor es definir el valor de  $W_s$ , puesto que esa velocidad de caída no es constante, pues hay un amplio rango de sedimentos y esa velocidad de caída no sólo depende del diámetro sino de la densidad de los sedimentos cohesivos.

En esta investigación se profundizó en la definición adecuada de la velocidad de caída.

Para el efecto se calibró de manera experimental una fórmula para relacionar la densidad de los flóculos con su diámetro, el cual se midió de manera experimental utilizando la técnica PTV. En la figura 5a se muestra una imagen con partículas sedimentarias (flóculos) y se observa la variabilidad de éstos, mientras que en la figura 5b se muestra un campo de velocidad de



(a)



(b)

Figura 5. Aplicación de la técnica de PTV: a) imagen de partículas (flóculos); b) campos de velocidad de partículas sedimentarias (flóculos).

los flóculos, determinado con la técnica PTV, y se observa que existe variación.

Utilizando la fórmula propuesta por Lau y Krishnappan (1997) siguiente:

$$\rho_s - \rho_w = (\rho_p - \rho_w) \exp(-bD^c) \quad (3)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad del sedimento (flóculo);  $\rho_p$  la densidad de las partículas primarias que constituyen el agregado; y  $b$  y  $c$  son dos constantes que dependen del tipo de flóculo y de la tasa de corte.

Al hacer un balance de fuerzas de sustentación y de sedimentación se obtiene que la velocidad de caída es:

$$W_s^2 = \frac{4(\rho_s - \rho_w)gD}{3C_d\rho_w} \quad (4)$$

Si se reemplaza la ecuación (3) en la (4) y se define el coeficiente de arrastre como  $C_d = 24/Rep$ , donde  $Rep = \rho_w W_s D / \mu$  y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del agua, entonces la ecuación (4) se transforma en:

$$W_s = \frac{(\rho_p - \rho_w)g \exp(-bD^c) D^2}{18\mu} \quad (5)$$

Los coeficientes  $b$  y  $c$  se calibraron utilizando el diámetro del flóculo en micrones. Sabiendo que  $\mu = \rho_w \nu$ , donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua que a 20 °C es  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , y considerando que  $D$  está en micrones, la ecuación (5) se transforma en:

$$W_s = 5.45 \cdot 10^{-7} \left( \frac{\rho_p}{\rho_w} - 1 \right) \exp(-bD^c) D^2 \quad (6)$$

Donde  $D$ , el diámetro del flóculo, está dado en micrones y la velocidad  $W_s$  en m/s.

Con los datos experimentales se lograron determinar los valores de  $b$  y  $c$  que mejor reproducen las velocidades de caída medidas por PTV.

A continuación se presenta los mejores ajustes a la ecuación (6) con los datos experimentales de flóculos, producto de comida para peces de diámetro entre 20 y 150 micrones, con densidad media de  $1.430 \text{ kg/m}^3$ .

Se tomaron imágenes cada cinco minutos para experimentos de duración cercana a una hora. Se muestran algunos de los datos ajustados con la ecuación (6). En las figuras 6 y 7 se observa que los datos obtenidos de la velocidad de caída de los flóculos obtenidos de forma experimental con PTV se ajustaron adecuadamente a la ecuación (6), con valores de  $b = 0.0037$  y  $c = 1.1$ . Además, se puede apreciar que existió proceso de floculación, ya que aunque los diámetros de las partículas primarias eran menores a 75 micrones, del resultado del análisis de las imágenes se obtuvieron diámetros mayores a 300 micrones.

Así, la ecuación resultante para calcular la velocidad de caída de los sedimentos provenientes de comida para peces es la siguiente (7), la cual puede ser utilizada para el diseño de tanques de recirculación con características de auto limpieza para su uso en la acuicultura, no descuidando la selección del sistema de entrada y salida del flujo, donde se considera una densidad de las partículas primarias de  $2.650 \text{ kg/m}^3$ .

$$W_s = 9 \cdot 10^{-7} D^2 \exp(-0.0037 D^{1.1}) \quad (7)$$

En la cual  $W_s$  está en m/s y  $D$  en micrones.

## Conclusiones

Utilizando un modelo a escala de un tanque de recirculación para acuicultura y comida para peces se lograron optimar las variables que rigen el funcionamiento de un tanque de recirculación para acuicultura. Por medio de la técnica óptica PIV se lograron determinar las características de flujo y distribución de los difusores para lograr una adecuada hidrodinámica en el tanque, que permita los

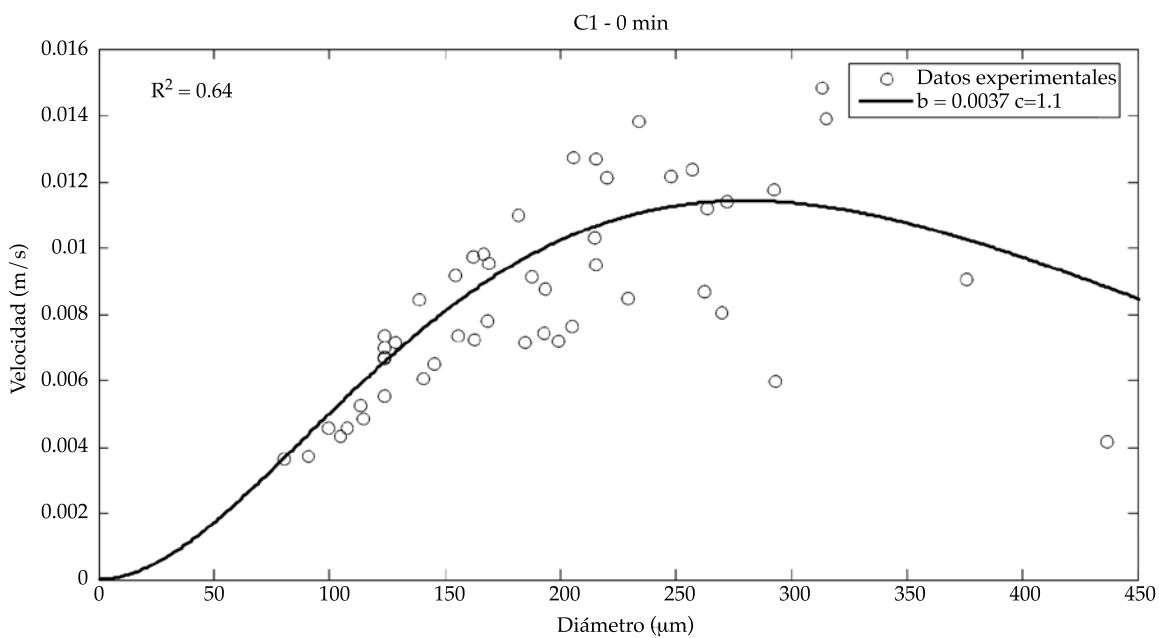


Figura 6. Resultados experimentales para velocidades de caída de sedimentos,  $t = 5$  minutos.

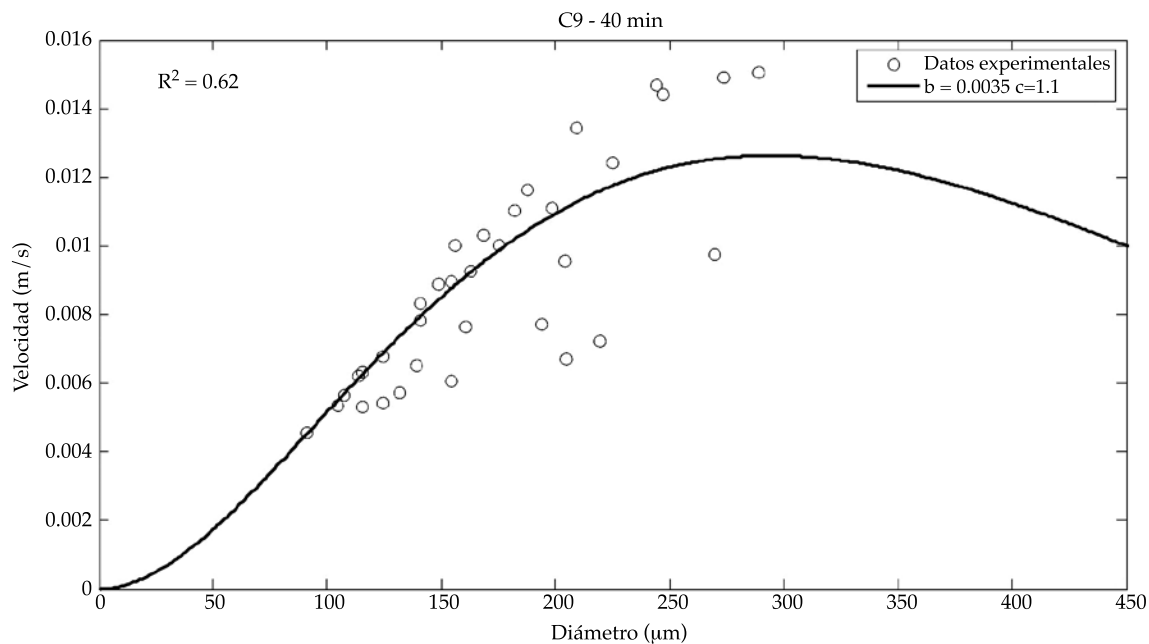


Figura 7. Resultados experimentales de velocidades de caída de sedimentos y ajuste para  $t = 40$  minutos.

procesos de floculación y los de sedimentación. Por medio de la técnica óptica de PTV se logró proponer una fórmula para determinar

las características del sedimentador central que proporcione una mayor remoción de sedimentos.

Se pudo comprobar que el diámetro óptimo del sedimentador depende de la velocidad de caída de los sedimentos presentes en el tanque (ecuación (2)). La mayor dificultad consiste en estimar de manera adecuada esa velocidad de caída. En esta investigación se utilizaron técnicas ópticas avanzadas como PIV y PTV, que permitieron calibrar una fórmula para estimar esa velocidad de caída en función de las características físicas del sedimento y de la hidrodinámica del tanque de recirculación (ecuación (7)).

Con los resultados obtenidos de las diferentes configuraciones de entrada y salida de flujo y con la aplicación de las técnicas ópticas de PTV y PIV para determinar los campos de velocidad, se lograron establecer criterios hidrodinámicos a considerar en el diseño de este tipo de tanques; éstos se refieren a las condiciones de entrada y salida de flujo, que afectan la distribución en la vertical de la velocidad del fluido y las velocidades de sedimentación de los flóculos.

## Referencias

- Adrian, R. J. (1991). Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 23, 261-304.
- Bastiaans, R. J. M., van der Plas, G. A. J., & Kleff, R. N. (2002). The Performance of a New PTV Algorithm Applied in Super-Resolution PIV. *Exp. Fluids*, 32, 346-356. **OJO AUTOR, ESTA REFERENCIA NO APARECE EN EL CUERPO DEL TEXTO**
- Chetverikov, D., Nagy, M., & Verestóy, J. (2000) Comparison of Tracking Techniques Applied to Digital PIV. *Proc. 15<sup>th</sup> ICPR*, Barcelona, Spain.
- Droppo, I. G., & Ongley, E. D. (1994). Flocculation of Suspended Sediment in Rivers of Southeastern Canada. *Water Research*, 28, 1799-1809.
- Droppo, I. G. (2001). Rethinking what Constitutes Suspended Sediment. *Hydrological Processes*, 14, 653-667.
- Droppo, I. G. (2005). Suspended Sediment Transport-Flocculation and Particle Characteristics. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. M. G. Anderson (Ed.). John Wiley & Sons, Ltd. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN**
- Duarte, S., Reig, L., Oca, J., & Flos, R. (October, 20-23, 2004). Computerised Imaging Techniques for Fish Tracking in Behavioural Studies. *Biotechnologies for Quality. Proceedings of the European Aquaculture Society* (pp. 310-311). Vol. 34. EAS Special Publication. Barcelona, Spain.
- Fouras, A., Lo Jacono, D., & Hourigan, K. (2008). Target-Free Stereo PIV: A Novel Technique with Inherent Error Estimation and Improved Accuracy. *Exp. Fluids*, 44, 317-329. **OJO AUTOR, ESTA REFERENCIA NO APARECE EN EL CUERPO DEL TEXTO**
- Gallego-Alarcón, I. (2010). *Evaluación y modelación de un tren de tratamiento de agua residual acuícola con recirculación y del cultivo de trucha arco-iris alimentado por cosecha pluvial*. Tesis de doctorado en Ciencias del Agua. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN Y CASA EDITORIAL (UNIVERSIDAD)**
- Gallego-Alarcón, I. (2004). *Diseño y evaluación de un sistema prototipo para el tratamiento de agua residual acuícola con reúso de agua en el cultivo de Oncorhynchus mykiss en la fase alevín-juvenil*. Tesis de maestría. CIRA, Facultad de Ingeniería, UAEM. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN**
- Gallego-Alarcón, I., García, D., Díaz, C., & Fall, C. (2004). Production of Juveniles of *Oncorhynchus mykiss* Using an Aquaculture Water Treatment Plant. En: Adams S. & J. Olafsen (Eds.). *Biotechnologies for Quality* (884 pp.). Bélgica: EAS. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN, NO PAÍS**
- García, P. D. (2008). *Evaluación de un sistema prototipo integral de cultivo de trucha con tratamiento y reciclado del efluente*. Tesis de Doctorado. CIRA, Facultad de Ingeniería, UAEM. **OJO AUTOR, FALTA CIUDAD DE EDICIÓN**
- García-Aragón, J., Droppo, I., Krishnappan, B., Trapp, B., & Jaskot, C. (2011). Experimental Assessment of Athabasca River Cohesive Sediment Deposition Dynamics. *Water Quality Research Journal of Canada*, 46(1). **OJO AUTOR, FALTAN PÁGINAS**
- Guasto, J. S., Haung, P., & Breuer, K. S. (November, 5-11, 2005). Statistical Particle Tracking Velocimetry Using Molecular and Quantum Dot Tracer Particles. *Proceedings of IMECE 2005-80051*, Orlando, Florida, USA. **OJO AUTOR, EN EL CUERPO DEL TEXTO SE TIENE GUASTU, NO GUASTO, ¿CUÁL ES EL APELLIDO CORRECTO?**
- Lau, Y. L., & Krishnappan, B. G. (1997). Measurement of Size Distribution of Settling Floccs. NWRI. Publication No. 97-223. Ontario: National Water Research Institute, Environment Canada, Burlington.
- Nicholas, A. P., & Walling, D. E. (1996). The Significance of Particle Aggregation in the Overbank Deposition of Suspended Sediment on River Floodplains. *Journal of Hydrology*, 186, 275-293.
- Ruhnauf, P., Guetter, C., Putze, T., & Schnörr, C. (2005). A Variational Approach for Particle Tracking Velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, 16, 1449-1458. **OJO AUTOR, ESTA REFERENCIA NO APARECE EN EL CUERPO DEL TEXTO**
- Salinas-Tapia, H., García-Aragón, J. A., Moreno, D., & Barrientos, G. B. (2006). *Particle Tracking Velocimetry (PTV)*

- Algorithm for Non-Uniform and Nonspherical Particles* (pp. 322-327). Vol. II. Cuernavaca, México: CERMA.
- Salinas, T. (2007). *Determinación de parámetros para flujo bifásico (sólido-líquido) por medio de técnicas ópticas*. Tesis de doctorado en Ingeniería. Toluca, México: Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, UAEM.
- Salinas-Tapia, H. & García-Aragón, J. A. (2011). Fórmula experimental para determinar la velocidad de caída de sedimentos en flujo transversal. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 175-182.
- Sundaresan, S., Eaton, J., Koch, D., & Ottino, J. (2003). Appendix 2: Report of Study Group on Disperse Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 29, 1069-1087.
- OJO AUTOR, EN EL CUERPO DEL TEXTO SE TIENE SUNDARESEN, NO SUNDARESAN, ¿CUÁL ES EL APELLIDO CORRECTO?**
- Timmons, M. B., Summerfeld, S. T., & Vinci, B. J. (1998). Review of Circular Tank Technology and Management. *Aquacultural Engineering*, 18, 51-69.
- Udrea, D. D., Bryanston-Cross, P. J., Lee, W. K., & Funes-Gallanzi, M. (1996). Two Sub-Pixel Processing Algorithms for High Accuracy Particle Centre Estimation in Low Seeding Density Particle Image Velocimetry. *Optics. & Laser Tech*, 28, 389-396.
- Summerfelt, S. G., Wilton, G., Roberts, D., Rimmer, T., & Fonkalrsrud, K. (2004). Developments in Recirculating Systems for Artic Char Culture in North America. *Aquacultural Engineering*, 30, 31-71. **OJO AUTOR, EN EL CUERPO DEL TEXTO SE TIENE SUMMERFELD,**
- NO SUMMERFELD, ¿CUÁL ES EL APELLIDO CORRECTO?**
- Watten, B. J., & Beck, L. T. (1987). Comparative Hydraulics of Rectangular Cross Flow Rearing Unit. *Aquaculture Engineering*, 6, 127-140.
- Wheaton, F. W. (1977). *Aquaculture Engineering* (708 pp.). New York: Wiley-Interscience.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Juan A. García-Aragón  
Dr. Humberto Salinas-Tapia  
M.C.A. Víctor Díaz-Palomarez  
Boris M. López Rebollar  
Javier Moreno- Guevara  
Leonarda M. Flores-Gutiérrez

Centro Interamericano de Recursos del Agua  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM)  
Cerro de Coatepec, CU  
50130 Toluca, Estado de México  
Teléfono: +52 (722) 2965 550  
jagarciaa@uaemex.mx  
hsalinast@uaemex.mx  
palomarez64@hotmail.com  
**OJO AUTOR, FALTAN CORREOS ELECTRÓNICOS  
y GRADOS ACADÉMICOS DE BORIS M. LÓPEZ  
REBOLLAR, JAVIER MORENO- GUEVARA Y  
LEONARDA M. FLORES-GUTIÉRREZ**