

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA**

**“INFORME TÉCNICO”**

**TÍTULO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:**

**“DETERMINACIÓN POR TÉCNICAS ÓPTICAS PIV Y PTV DE LAS  
CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DE FLOCS EN SISTEMAS  
CANALES CIRCULARES ROTATORIOS”**

**CLAVE UAEM 3395/2013M**

**TÍTULO DE MEGAPROYECTO:**

**“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA FLOCULACIÓN DE SEDIMENTOS  
COHESIVOS; APLICACIONES EN TRATAMIENTO DE AGUAS Y  
ACUACULTURA”**

**Responsable técnico: Dr. Humberto Salinas Tapia**

**Responsable del Megaproyecto: Dr. Juan Antonio Garcia Aragón**

**TOLUCA, MÉXICO.**

**ENERO 2015**

# DETERMINACIÓN POR TÉCNICAS ÓPTICAS PIV Y PTV DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DE FLOCS EN SISTEMAS CANALES CIRCULARES ROTATORIOS

<sup>1</sup>Salinas-Tapia Humberto, <sup>1</sup>García-Aragón Juan Antonio, <sup>2</sup>Duran-García Maria Dolores  
<sup>3</sup>López-Rebollar Boris Miguel, <sup>3</sup>Mondragón-Alcántara David.

<sup>1</sup> Profesor-Investigador, Centro Interamericano de Recursos del Agua, CIRA-UAEMex.

<sup>2</sup> Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, FI-UAEMex.

<sup>3</sup>Estudiante de Maestría en Ciencias del Agua, Centro Interamericano de Recursos del Agua CIRA-UAEMex.  
Carretera Toluca Ixtlahuaca Km. 14.5, Unidad San Cayetano C.P. 50200, Toluca, México.

e-mail: [hsalinas@hotmail.com](mailto:hsalinas@hotmail.com), [jagarciaa@uaemex.mx](mailto:jagarciaa@uaemex.mx), [mddg\\_2210@hotmail.com](mailto:mddg_2210@hotmail.com), [borislopreb@gmail.com](mailto:borislopreb@gmail.com),  
[david.mondragon.a@gmail.com](mailto:david.mondragon.a@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

Dada la importancia que se tiene hoy en día en el desarrollo e innovación de tecnología, en este proyecto se presenta un aporte a la investigación tecnológica, con la construcción de un canal circular rotatorio, cuya característica importante es que su diseño permite la instalación de sistemas ópticos para la caracterización de partículas y determinación de campos de velocidad del fluido, además de la automatización y control por computadora del canal. Esta investigación es considerada como un sub-proyecto del Megaproyecto de Investigación y desarrollo tecnológico de la Universidad Autónoma de Estado de México, UAEM titulado **“Análisis experimental de la floculación de sedimentos cohesivos; Aplicaciones en tratamiento de aguas y acuacultura”**.

Se concuerda en el medio científico que hace falta un mayor sustento experimental que permita definir claramente la hidrodinámica de las partículas de sedimentos finos, de forma no invasiva e intrusiva. En este proyecto se ha construido un canal circular de flujo anular con paredes de plexiglás transparente, para permitir acceso óptico con la finalidad de determinar de forma bidimensional la velocidad del flujo, así como el estudio del proceso de coagulación-floculación de sedimentos finos, determinando la velocidad de caída de las flocs.

Para contar con el diseño adecuado y garantizar su funcionamiento del canal circular de flujo anular, es necesario realizar la modelación numérica del canal, la cual fue desarrollada utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), donde se determina el comportamiento del flujo secundario y las relaciones óptimas entre la velocidad de rotación y la altura del flujo. Para posteriormente y de forma experimental comparar los resultados del modelo CFD utilizando técnicas ópticas de PIV (Particle Image Velocimetry).

En esta investigación se ha utilizado la modelación numérica para la evaluación del comportamiento hidrodinámico del canal circular, y validado experimentalmente con la técnica óptica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Además el uso del canal circular, permitirá en trabajos posteriores realizar estudios más completos del comportamiento de los sedimentos cohesivos, relacionados a los procesos de sedimentación en sistemas de tratamiento, ríos o estuarios.

El enfoque del trabajo fue analizar el comportamiento hidrodinámico de un canal circular con velocidad variable, diseñado como parte del megaproyecto producto de esta investigación, y construido en el Laboratorio de Visualización de Flujos del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), para su uso en el estudio de los procesos de coagulación/floculación de sedimentos cohesivos. Para ello, se realizó la simulación hidrodinámica del canal aplicando Computacional Fluid Dynamics (CFD) mediante el software ANSYS-FLUENT, considerando diferentes escenarios del comportamiento del flujo.

Se realizaron diferentes simulaciones considerando distintas relaciones  $\omega_s/\omega_f$  (velocidad de rotación de la tapa/velocidad de rotación del canal), para determinar la que permita minimizar los flujos secundarios y la turbulencia en el canal, para garantizar un buen proceso de floculación. Con la simulación se obtuvieron los campos de velocidad en 3D, perfiles de velocidad tangencial, radial y vertical así como la turbulencia en 3D. Esto permitió analizar el comportamiento del flujo y establecer los rangos de operación del canal principalmente las velocidades de rotación.

## **ANTECEDENTES**

Distintos problemas de calidad del agua están ligados a la presencia de sedimentos finos suspendidos, cuya eliminación es compleja y requiere de

procesos de coagulación-floculación, o técnicas avanzadas de eliminación de sólidos. Además los sedimentos se asocian con contaminantes inorgánicos nocivos para la biótica acuática, que les permite, según determinadas condiciones de escurrimiento, formar agregados o flóculos compuestos por miles de partículas.

La capacidad de comprender y predecir los procesos generados por los sedimentos finos es limitada, siendo necesario el desarrollo de tecnología que permita comprender los fenómenos, pero de una forma no invasiva que no alteren las condiciones de aglomeración de partículas por medios mecánicos. Para ello, se han utilizado los canales circulares de flujo anular. Empleados ampliamente para estudiar la dinámica física de las relaciones agua-sedimento (Lau y Krishnappan, 1992; Graham et al., 1992).

Una ventaja importante de los canales circulares, con respecto a los canales de flujo recto es, que se pueden controlar las velocidades de flujo así como la tasa de corte. Sin embargo, los canales circulares, tienden a generar flujos secundarios y variabilidad radial del esfuerzo inferior (Gharabaghi et al., 2007). Siendo importante cuando se diseña y construye este tipo de canales, minimizar los flujos secundarios, el cual ha sido uno de los aportes de este trabajo, además de contar con un canal con condiciones de tasa de corte constante y velocidades de rotación variables.

El flujo secundario se genera por la fuerza centrífuga debido a la curvatura del canal de flujo y al gradiente vertical de la velocidad radial. Por lo tanto, debido a la presencia de la circulación secundaria y la variación en la magnitud de la velocidad radial a través del lecho del canal, la distribución del esfuerzo de corte inferior generalmente no es uniforme lo que demuestra que en los canales se produce erosión.

La componente de velocidad vertical del flujo secundario, en general, es mucho mayor que la velocidad de sedimentación, lo que provoca un fuerte impacto en los procesos de sedimentación y de arrastre de sedimentos en suspensión, principal problema en la eliminación de sedimentos finos. Siendo importante determinar las condiciones hidrodinámicas óptimas para minimizar los flujos secundarios en los canales circulares.

Para reducir la circulación secundaria y la variación radial del esfuerzo de corte inferior, se hace girar en sentido contrario el canal, respecto de la tapa, es decir, se hace girar la parte inferior del canal en una dirección, y en dirección opuesta el anillo superior (la tapa), ambos con velocidades variables. La idea es entonces, que la circulación secundaria de flujo generada por la rotación del canal es en la dirección opuesta a la generada por la rotación de la tapa superior. Así, los dos flujos de circulación secundarias se anulan parcialmente entre sí. Sin embargo, este efecto solo se logra realizando simulaciones y encontrando las relaciones de

velocidad óptimas entre el canal y el anillo superior, pero uno de los problemas importantes es la determinación de la velocidad de forma experimental.

Muchos investigadores han realizado mediciones directas de velocidades radiales en canales de flujo anular. Han utilizado anemometría de hilo caliente para medir la velocidad de rotación en el anillo dentro del estudio de arrastre de sedimentos cohesivos. Mediciones de alta resolución fueron tomadas cerca de la capa límite inferior. También, se ha realizado mediciones detalladas de los campos de flujo utilizando anemómetro láser Doppler (James et al., 1996), para ello se han utilizado dos modos de operación del canal: la tapa superior del canal girando solamente y, el canal y la tapa girando en direcciones opuestas.

Se han realizado mediciones para investigar el impacto de la tapa superior y la relación de rotación del canal en la distribución de la tasa de corte a través del lecho. Como se puede observar, existen trabajos realizados para el estudio de sedimentos finos en canales anulares. Pero el principal problema, es el costo del equipo además de su calibración y puesta en marcha. Dentro de este proyecto se ha diseñado y construido un canal anular con la finalidad de estudiar los sedimentos finos y el proceso de floculación, y con la instalación de un sistema de velocimetría óptica para determinar los campos de velocidad de forma no invasiva.

Existen diversas técnicas ópticas para el estudio del movimiento de fluidos en 2D, pero cuando se utiliza como fluido agua las más aplicadas son: la técnica de

Velocimetría por imágenes de partículas (Particle Image Velcimetry-PIV) y la técnica de Velocidad por Rastreo de Partículas (Particle Tracking Velocimetry-PTV) (Adrián, 1991; Salinas, 2007; Salinas y Garcia, 2011). El principio fundamental de las técnicas es obtener la velocidad de partículas trazadoras que siguen fielmente al fluido (con densidad similar), por medio del procesamiento digital de imágenes de partículas (Adrian, 1991).

Sin embargo, la diferencia principal es la densidad de partículas detectadas en una imagen. PIV requiere de imágenes con alta densidad de partículas dado que el procesamiento para obtener los campos de velocidad es utilizando técnicas de correlación y ha resultado ser eficiente para determinar la velocidad de fluidos, técnica que se ha utilizado en este trabajo para el estudio de la hidrodinámica del canal. Mientras que, para la técnica PTV, las imágenes deben contener baja densidad de partículas debido a que la velocidad es determinada de forma individual para cada partícula, y ha resultado ser una técnica adecuada para determinar la velocidad de forma instantánea de partículas sedimentarias (Salinas et al., 2011), esta técnica combinada con otras técnicas ha resultado ser más eficiente, por ejemplo con la técnica de separación de fases, y dentro de este proyecto se ha desarrollado un herramienta computacional para el procesamiento de imágenes que incluye el método de separación de fases.

La técnica de separación de fases es una técnica aplicada al estudio de flujos bifásicos, que permite discriminar partículas que pertenecen a una fase para



posteriormente obtener información, eliminando el ruido que genera una fase sobre otra (Khalitov y Longmire, 2002).

La separación de fases consiste en determinar de forma independiente, los desplazamientos de las partículas de las diferentes fases presentes en una misma imagen, aplicando diferentes criterios de discriminación. Los parámetros de discriminación más importantes en la separación de fases son: el tamaño de la partícula y su brillantez (propiedades de superficie). Dado este principio, la técnica PTV en conjunto con la técnica de separación de fases ha permitido obtener campos de velocidad de partículas sedimentarias de diámetros comprendidos entre 0.075 a 1.00 mm (Salinas, et al., 2014). Su uso en esta investigación, es fundamental en la caracterización de los flocs, ya que son partículas de diversos tamaños, con velocidad de sedimentación variable. La aplicación de PTV con separación de fases siguiendo el criterio del tamaño, resulta ser más eficiente en la determinación de la velocidad de caída de sedimentos cohesivos (flocs).

## **JUSTIFICACIÓN**

Los estudios de laboratorio permiten el análisis de los mecanismos de transporte de sedimentos cohesivos en condiciones controladas. Para este tipo de estudios, los canales de flujo anular son un uso común, como tipo de banco de pruebas ya que están diseñados específicamente para proporcionar un patrón de flujo infinito y no interferir con los procesos de floculación (Parchure y Mehta, 1985), situación

que no ocurre cuando se utiliza por ejemplo la prueba de jarras tradicional, que por su principio se considera una prueba invasiva, que modifica el comportamiento del flujo.

En diversos laboratorios de las universidades del mundo que se dedican a la investigación de la hidráulica fluvial, cuentan con canales de flujo anular con una superficie libre, los cuales se utilizan para estudios de laboratorio sobre cohesión del transporte de sedimentos. Los resultados han demostrado, que las características del sedimento y las condiciones hidráulicas del canal ejercen una influencia significativa en la sedimentación de partículas cohesivas, cuyo parámetro importante es la tasa de corte, ya que tiene influencia en la formación de los flocs (Garcia et al., 2011).

Sin embargo, dados los costos que genera el desarrollo experimental, y con el avance de la tecnología, en los últimos años, los modelos numéricos se han utilizado con frecuencia para simular el transporte de sedimentos cohesivos. Diversos estudios numéricos se han realizado en situaciones de campo a gran escala (El Ganaoui et al., 2004, Lopes et al., 2006). Las simulaciones hidrodinámicas incluyendo cálculos de transporte de sedimentos cohesivos de experimentos de laboratorio con el fin de probar los modelos numéricos son escasos (Teisson, 1997; Krishnappan, 2007).

El uso del canal circular tiene como principal virtud el control de la velocidad de rotación tanto de la tapa como del canal y por ende el control de la tasa de corte, lo cual es difícil de hacer en canales rectos. Además por el diseño se puede variar esta tasa de corte de acuerdo a cambios en la velocidad de rotación del canal de acuerdo al tipo de sedimento en estudio y efectuar experimentos de larga duración con tasa de corte controlada hasta obtener concentraciones de equilibrio, principalmente de coagulantes.

Para garantizar el funcionamiento adecuado del canal circular, el uso de la modelación numérica es hoy en día fundamental en la simulación de diferentes fenómenos físicos y que además puede reducir en gran medida los costos al momento de construir obras importantes en el ámbito de la ingeniería. Uno de los aportes importantes del proyecto, fue la construcción, operación y automatización del canal, pero uno de los retos más importantes es la instalación del equipo de velocimetría óptica (Velocimetría por imágenes de partículas –PIV-), para determinar de forma experimental los campos de velocidad y la validación del modelo numérico de simulación del flujo. Además, de la instalación del sistema óptico, también se implementó el algoritmo de separación de fases al de PTV, para determinar la velocidad de partículas sedimentarias en específico para la caracterización de los flocs.

## **DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

En los últimos años la dinámica de fluidos computacional (CFD), se ha utilizado ampliamente en el estudio y modelación de flujos dentro de la mecánica de fluidos, resultando ser una herramienta eficiente y de bajo costo. En esta investigación se presenta la simulación de un canal de flujo anular rotatorio, diseñado para estudiar los sedimentos cohesivos, utilizando el modelo de dinámica de fluidos computacional denominado ANSYS-FLUENT.

Dentro de la Hidráulica y Mecánica de Fluidos ha sido de gran ayuda el uso de la CFD para estudiar el comportamiento de los fluidos (en cualquiera de sus estados físicos) dentro, o en contacto, con un medio. Con la CFD es posible aplicar y resolver de manera teórica las ecuaciones gobernantes y simular el comportamiento de un fluido y su interacción con otro medio, a fin de observar de manera gráfica los fenómenos relacionados con su movimiento. Las ecuaciones relacionadas con los fluidos, son las ecuaciones de turbulencia (derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes), ecuaciones de transporte de Reynolds (Advección-Difusión), entre otras, las cuales pueden ser fácilmente resueltas por medios iterativos gracias a la CFD.

Dentro del modelo de CFD ANSYS-FLUENT, se establecen ecuaciones y modelos que para la simulación del flujo. Así mismo, se cuentan con esquemas numéricos y algoritmos de solución que permiten lograr la convergencia de forma eficiente y

mostrar resultados confiables. Las ecuaciones y esquemas de solución se establecen de acuerdo a las características del flujo que se analiza y las condiciones iniciales y de frontera del fenómeno en estudio.

Para este trabajo, la solución de la hidrodinámica del flujo en el canal circular, fue basada en determinar los campos de velocidad, aplicando el modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  (K-Épsilon, energía cinética y su tasa de disipación), la ecuación conservación de la masa, conservación de la energía y de Momentum.

Ecuación de conservación de la masa (Continuidad)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Ecuación de Momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho(u,v,w))}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho(u,v,w))}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho(u,v,w))}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho(u,v,w))}{\partial z} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial(x,y,z)} + \nu \frac{\partial^2(u,v,w)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(u,v,w)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(u,v,w)}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Ecuación de conservación de energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3)$$

Donde:  $x, y, z$  son los ejes del sistema coordenado;  $u, v$  y  $w$  son las componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad;  $\rho$  es la densidad del fluido (para este caso, agua;  $p$  es la presión absoluta;  $T$  es la cantidad de calor del fluido;  $C_p$  es el

calor específico del fluido,  $\lambda$  es la conductividad térmica. Además, para el fenómeno de turbulencia se estableció el modelo matemático que rige su comportamiento. El modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\varepsilon$  aplicado es:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho wk)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + (P - D) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w \varepsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} D) \quad (5)$$

donde

$$P = 2\mu_T \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_T \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu_T \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \rho \mu_T k \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$D = \rho \varepsilon \quad (7)$$

$k$  es la energía cinética;  $\varepsilon$  es la tasa de disipación de la energía cinética;  $\mu$  coeficiente de viscosidad dinámica;  $\mu_T$  viscosidad local de turbulencia;  $P$  y  $D$  son términos de producción y destrucción, respectivamente;  $\sigma$  y  $C$  son constantes ajustables, según datos experimentales. Este modelo se aplicó para predecir la energía cinética presente dentro del tanque y así garantizar su aportación a los campos de velocidad para que estos fuesen representativos del comportamiento del flujo dentro del tanque.

## CANAL ANULAR

Como parte del megaproyecto, se diseñó y construyó el canal circular de flujo anular, con características de control automático y acceso óptico. Es importante acotar que la fabricación y maquinado de las piezas para la construcción del canal, fueron conforme al diseño realizado en el sub-proyecto “DISEÑO MECÁNICO DE UN CANAL ROTATORIO PARA EL ANÁLISIS DE FLUIDOS”, la construcción se realizó en las instalaciones del CIRA y el maquinado de piezas se realizó en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería y del CIRA.

Para el diseño, se realizó el modelamiento en 3D, para su posterior construcción. En la figura 1 se muestra el modelo del canal y una imagen del canal construido físicamente, mientras que en la tabla 1 se describen las partes del canal así como sus dimensiones. El funcionamiento del canal es el siguiente: la tapa está sostenida mediante un soporte en estrella, el cual la hace girar con la ayuda de un motor de velocidad variable, ubicado en la parte superior. El soporte de la tapa puede ajustarse a diferentes alturas para controlar el tirante de agua dentro del canal.

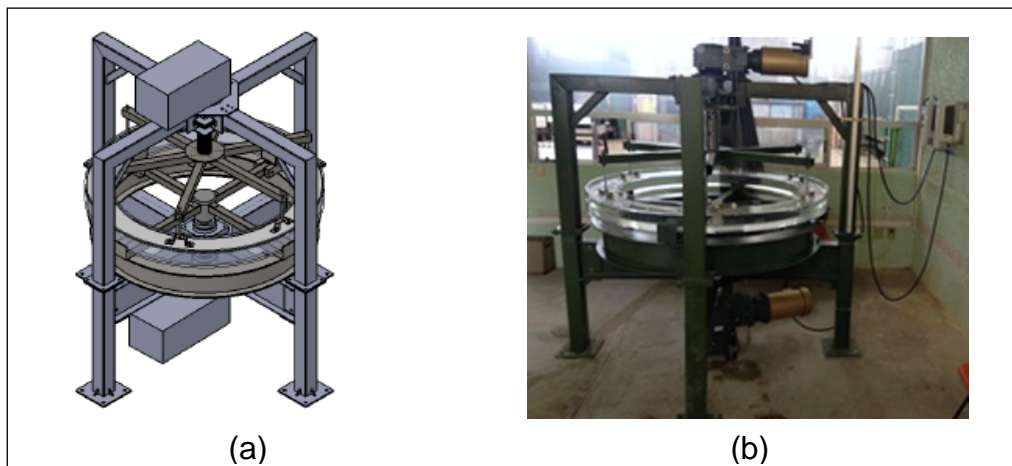


Figura 1. Canal circular de flujo anular, diseñado y construido en el CIRA; a) Modelo del canal, b) Canal construido

Por otro lado, el canal se encuentra ubicado en un soporte conectado a otro motor de velocidad variable ubicado en la parte inferior que hace girar el canal sobre una pista, la cual evita vibraciones que afecten la hidrodinámica del flujo. Los motores están conectados a sus respectivos variadores de velocidad para controlar su velocidad de rotación. Las velocidades de rotación del canal están en el rango de 0 a 20 rpm y las de la tapa del orden de 0 a 30 rpm.

Con fines de control, se desarrolló un sistema de control por computadora de los motores, para ello se utilizó el software de LabView. También permite sincronizar los equipos de captura con el canal circular, es decir sincroniza los tiempos de captura de imágenes con los pulsos de luz láser y todo está en función de la frecuencia de los motores. En la figura 2 se muestra la interfaz desarrollada, este sistema garantiza la correcta relación de velocidades además monitorea el comportamiento de los motores del canal, lo cual es muy importante dada la eficiencia de cada uno de ellos.

## **METODOLOGÍA**

Para la simulación del flujo se utilizó el software ANSYS-FLUENT, el cual puede trabajar sobre el volumen del fluido a modelar de forma independiente, en este caso el líquido confinado entre la tapa y el canal (Figura 3) o bien con las fronteras sólidas que confinan el fluido, el canal y la tapa. En este trabajo se consideró el



volumen de agua extraído y las condiciones iniciales y de frontera fueron aplicadas a éste.

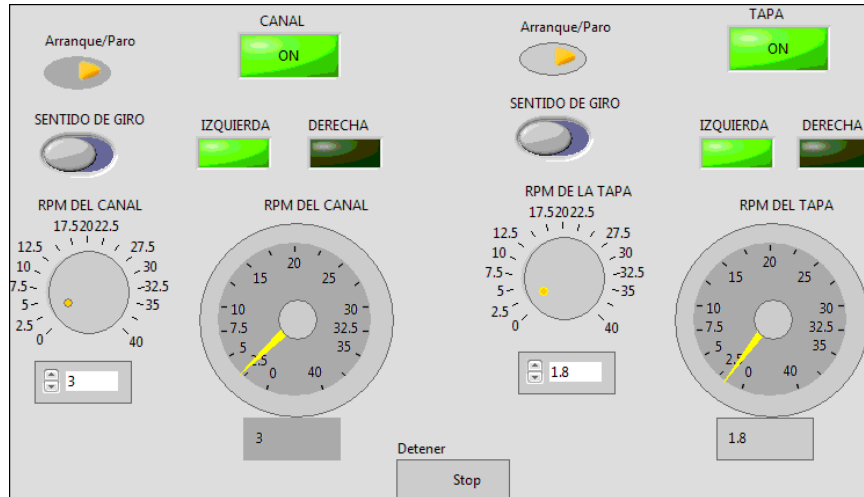


Figura 2. Sistema de control automático y de sincronización del canal circular de flujo anular.

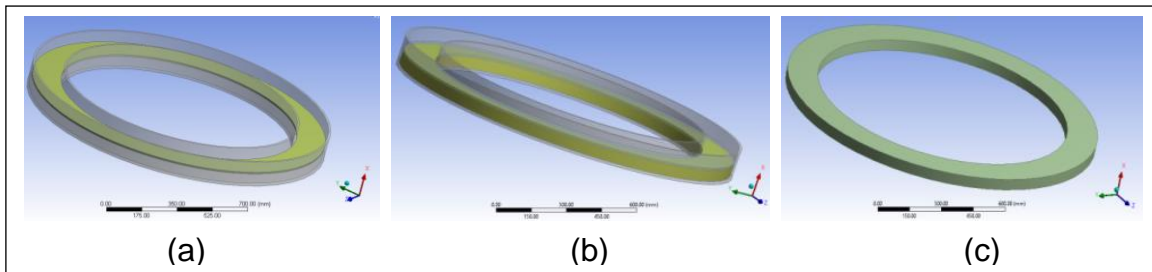


Figura 3. Modelo en 3D del canal y la tapa, a). Modelo como un solo elemento; b). Volumen del agua confinado; c). volumen del agua extraído

Tabla 1. Descripción de los componentes del canal.

Componente	Características	Observaciones
Canal circular	Sección transversal de 15 cm de ancho, 13 cm de alto, y diámetro de 1.5 m.	Construido con plexiglás de 10 mm de espesor. El tirante de agua varia 0 a 10 cm.
Tapa del canal	Ancho de 14.5 cm y diámetro de de 1.5 cm.	Construida de plexiglás transparente para el acceso óptico, y cuenta un mecanismo para variar la altura de acuerdo al tirante de estudio.
Motoreductor para el canal circular	Capacidad de 3 HP, rel 91.22:1, de 19 rpm rango de operación de 5-25 rpm	El rango de operación máximo es de 30 rpm.
Motoreductor para la tapa del canal circular	Capacidad de 1.5 HP, rel 90.89:1, de 19 rpm rango de operación de 5-25 rpm	El rango de operación máximo es de 30 rpm.
Estructura del canal.	Elaborada con perfiles de acero, la pista de rodamiento del canal se ubica a 90 cm del piso y la altura total de la estructura es de 2.0m. Los aditamentos de los motores a los ejes del canal y de la tapa fueron elaborados con Nylamid industrial.	El canal cuenta con rodamientos de baja fricción, y la tapa cuenta con el mecanismo para la variación de altura que se ajusta al tirante dentro del canal.

La Figura 4a muestra el dominio (flujo confinado) del agua dentro del canal. Donde las fronteras del volumen del fluido las conforman las paredes, fondo y tapa del canal anular. Para la simulación, se trabajó solamente con el dominio del fluido al cual se le realizó el proceso de mallado, seleccionando la malla de mejor calidad en sus elementos y cuyos resultados no presentaran discrepancias. Para este caso, se realizó el mallado con elementos hexaédricos con un barrido a lo largo del eje “Y” del canal. Gracias a que la geometría es uniforme y simétrica, es válido utilizar este tipo de malla.

Dentro del módulo ANSYS-FLUENT, se establecieron las ecuaciones y modelos que se aplicaron para la simulación del flujo. Así mismo, se seleccionaron los esquemas numéricos y algoritmos de solución que mejor se ajustaron para lograr convergencia en el análisis y resultados. Las ecuaciones y esquemas de solución se establecieron de acuerdo a las características del flujo y las condiciones iniciales y de frontera. El fluido utilizado en la modelación fue agua con las propiedades mostradas en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Propiedades del agua utilizada en la modelación

Densidad	998.2	Kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	4182	j/kg-k
Conductividad térmica	0.6	w/m-k
Viscosidad	0.001003	Kg/m-s

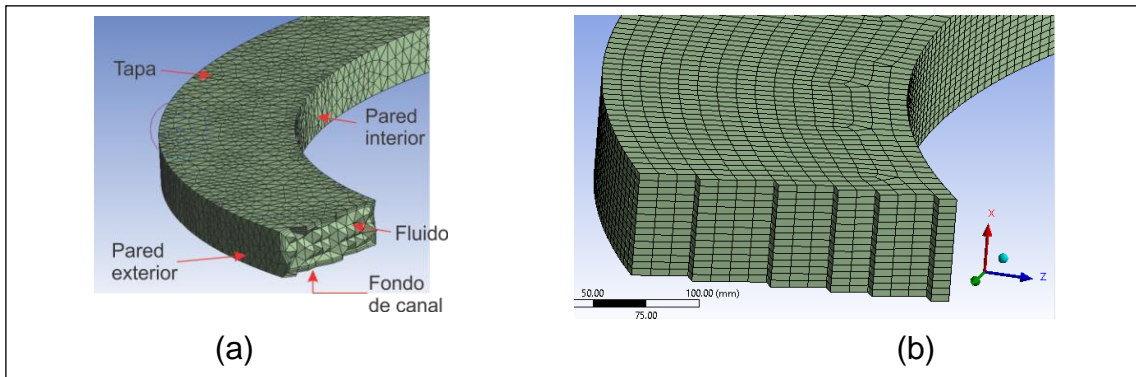


Figura 4. Dominio del fluido; a) Esquema de condiciones de frontera y dominio del canal; b) Malla utilizada para en el dominio

Las condiciones de frontera establecidas fueron: a) Paredes del canal, b) Fondo del canal y c) Tapa del canal. Las condiciones a) y b) forman el canal como un solo elemento. Las paredes y fondo del canal, al igual que la tapa, fueron asignadas, como paredes rotatorias. El volumen interior fue asignado como el dominio Fluido con las propiedades del agua líquida. Las condiciones de celdas y de frontera se establecieron como lo indica la Tabla 3. Para obtener los valores de la velocidad de rotación de las fronteras se desarrolló un análisis paramétrico.

Para la calibración del software de CFD fue necesario realizar simulaciones y comparaciones con las presentadas en la literatura. Para fines de comparación se selecciona el trabajo presentado por Gharabaghi et al., (2007) en el cual realizaron la modelación de un canal anular mediante CFD. Su objetivo fue predecir las características del flujo turbulento complejo en 3D, incluyendo la distribución de velocidad tangencial del flujo, los patrones de flujo turbulento secundario y

distribución de la capa de esfuerzo cortante. Mediante el uso de CFD lograron identificar la relación óptima entre la velocidad de rotación de la tapa y el canal, la cual fue de aproximadamente 1.2.

**Tabla 3.** Condiciones de frontera

<b>Elemento</b>	<b>Zona</b>	<b>Condición</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Volumen de agua	Interior	Elementos interiores	-	-
Canal	Pared adyacente al fluido	Frontera	Rotación de pared sobre el eje X.	Velocidad variable (rpm)
Tapa	Pared adyacente al fluido	Frontera	Rotación de pared sobre el eje X.	Velocidad variable (rpm)

En las figuras 5 y 6 se muestra la comparación entre el canal anular del presente trabajo y el canal anular descrito en Gharabaghi et al., (2007). Puede observarse que prácticamente se presenta el mismo patrón de flujo de los campos de velocidades con relación  $\omega_s/\omega_f$  de 1.0 y 1.2. Las magnitudes de velocidad no son las mismas debido a la diferencia de tamaños de ambos canales sin embargo, en ambos se presentan los flujos secundarios y el mismo comportamiento hidrodinámico del flujo. Con ello se garantiza el uso del CFD, en el análisis del canal circular desarrollado en el CIRA.

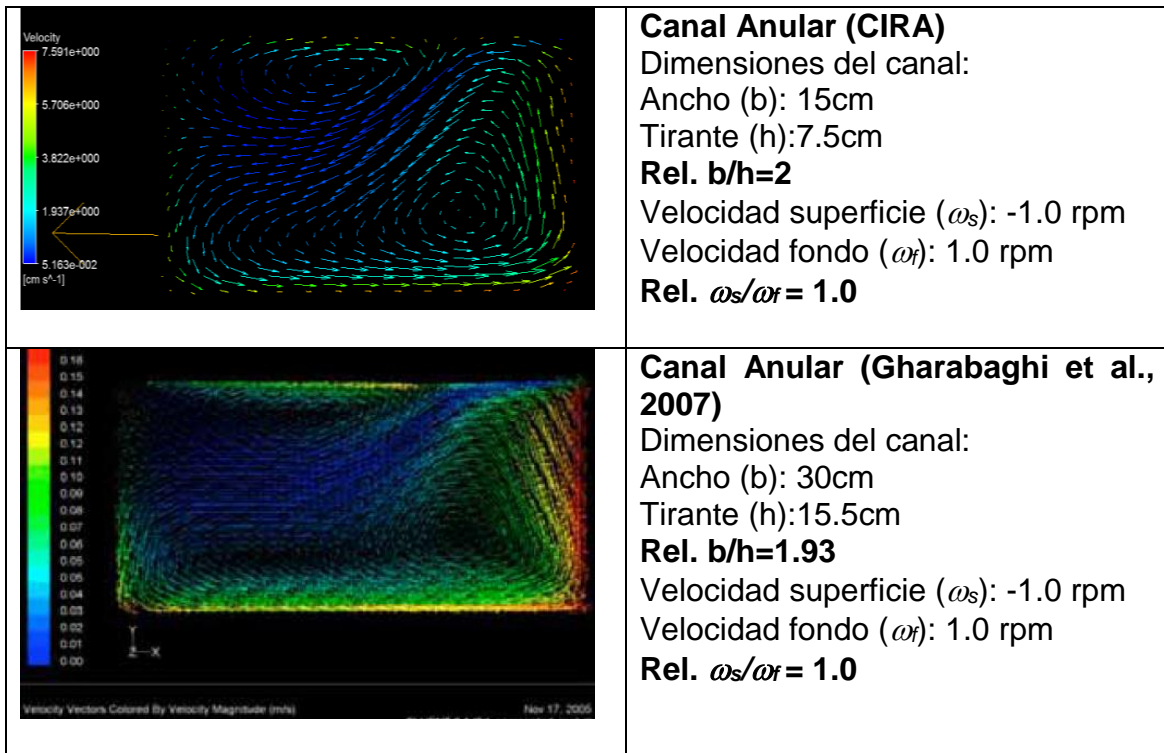


Figura 5. Comparación entre campos de velocidades  $\omega_s/\omega_f = 1.0$

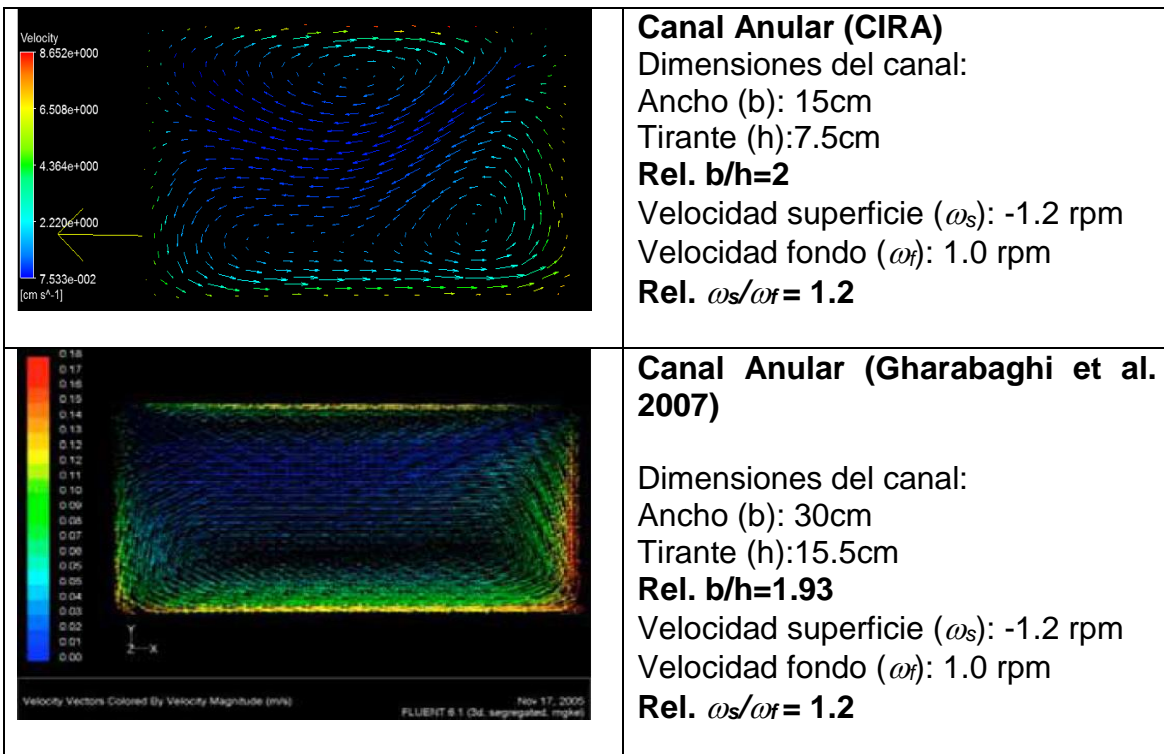


Figura 6. Comparación entre campos de velocidades  $\omega_s/\omega_f = 1.2$

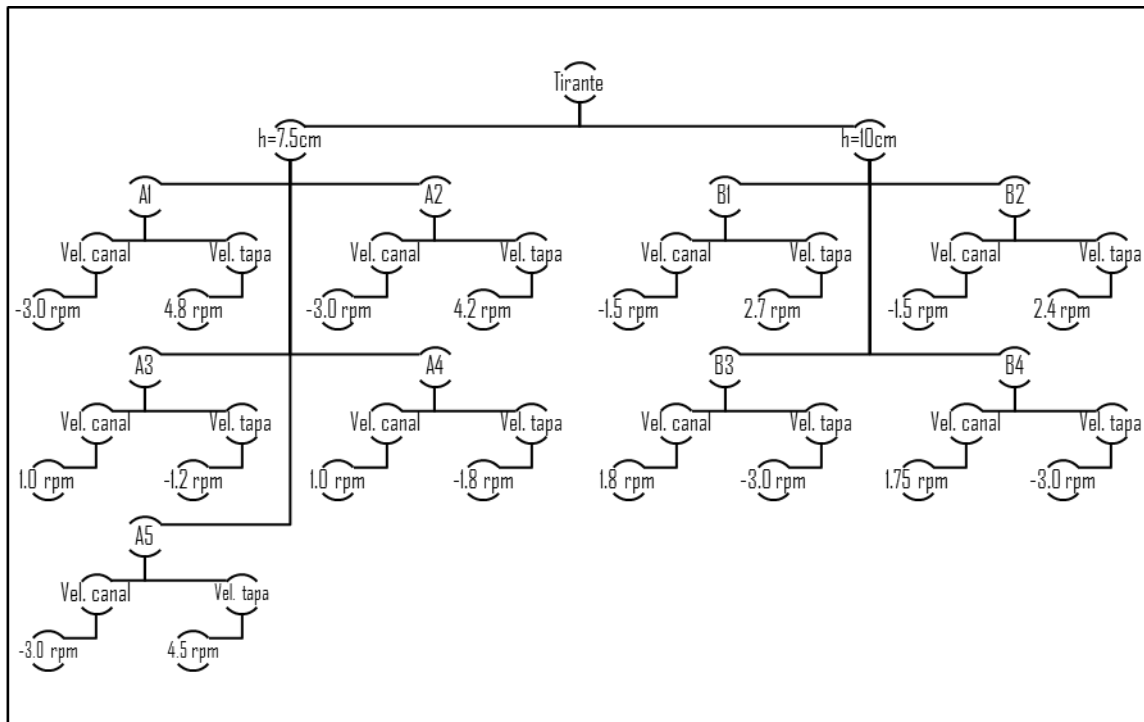
Es importante destacar que en el trabajo desarrollado por Gharabaghi et al., (2007) el modelo fue adaptado para el canal siendo estacionario, incompresible y totalmente turbulento. El modelo de turbulencia que utilizaron fue bajo la teoría normalizada o RNG  $\kappa$ - $\epsilon$ . Las condiciones de frontera fueron similares a las establecidas en el presente trabajo, es decir, fronteras tipo pared con velocidad angular para el canal y la tapa.

Además con los resultados se determina que cada caso de estudio es diferente aunque se tengan las mismas condiciones de operación del fenómeno, pero es importante destacar la validación, que no importando el software de simulación a utilizar, en CFD se emplean las mismas ecuaciones para el análisis y simulación de flujos.

Como se mencionó, cada canal anular presenta un comportamiento único y característico debido principalmente a sus dimensiones geométricas (curvaturas relativas:  $b/R$ ,  $b$ =ancho de canal,  $R$ =radio del canal, Booij, 1994). Sin embargo, en este proyecto se tomaron en cuenta como punto de partida los resultados obtenidos en trabajos anteriores, a fin de encontrar aquellas relaciones de velocidad angular óptimas para el canal en estudio.

Booij (1994) realizó una serie de experimentos donde llevó a cabo mediciones de velocidad del flujo en un canal anular mediante Velocimetría Doppler. Para este proyecto se aplicó la técnica de velocimetría por imágenes de partículas para

comparar los resultados. Los experimentos propuestos para llevar a cabo la simulación de los diversos escenarios (A y B) de operación del canal se muestran en la Figura 7. En la Tabla 4 se muestran las velocidades y relaciones  $\omega_s/\omega_r$  planteadas en el presente trabajo.



**Figura 7.** Arreglo de experimentos llevados a cabo en la modelación

## SISTEMA ÓPTICO DE PIV.

Respecto al sistema óptico, se utilizó un sistema de PIV, equipado con: una fuente de luz láser Nd: YAG (doble pulsado) de 15 mJ, diferentes accesorios ópticos (lentes, espejos, etc.), una cámara mca JAI mod CV-M2, con resolución espacial



de 1600 x 1200 píxeles y temporal de 30-250 fps (cuadros por segundo), lente NIKON de 50 mm, un sincronizador de señales construido y programado en el CIRA. En la figura 8, se muestra un diagrama esquemático de la configuración del sistema óptico y una imagen del sistema instalado en el canal circular.

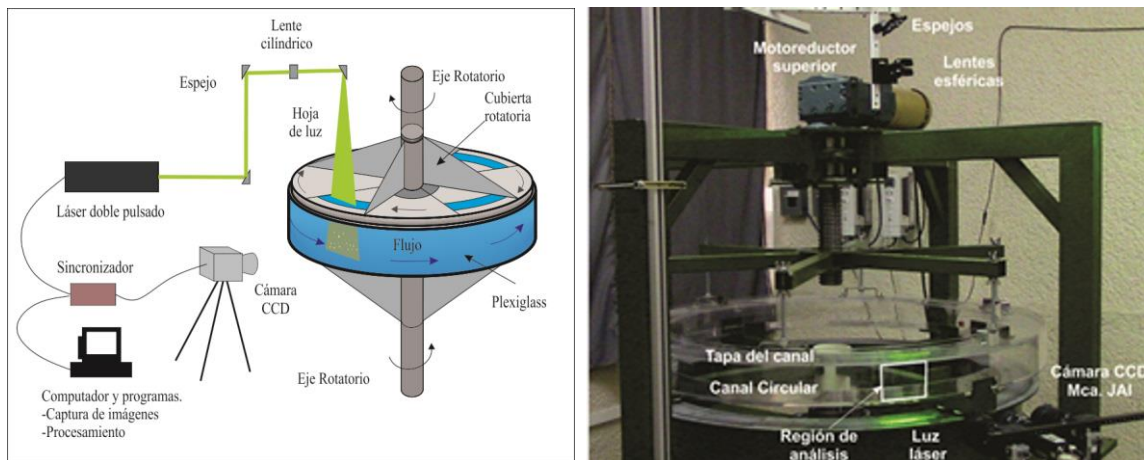


Figura 8. Diagrama esquemático del sistema experimental.

Una vez realizada la instalación y calibración de los equipos se realizó la caracterización del flujo con la técnica PIV. Se empleó agua potable como fluido, partículas trazadoras de poliamida de  $25 \mu m$  de diámetro y densidad de  $1.03 \text{ gr/cm}^3$ . Durante la etapa de adquisición de imágenes, se capturaron en promedio 200 imágenes monopulsadas en 4 repeticiones para cada relación de velocidad, con el software SofCamDan (desarrollado en el CIRA). El procesamiento de las imágenes PIV para obtener los campos de velocidad del fluido, se realizó con el software ProVISION XS, el cual contiene diferentes métodos de correlación, en

este trabajo se utilizó el método de correlación adaptativa, subdividiendo la imagen en regiones de análisis de 34 píxeles.

**Tabla 4.** Relación de velocidades angulares utilizadas para el estudio de la hidrodinámica del canal.

Dimensiones de Canal	Velocidad Angular (rpm)		Relación $\omega_s/\omega_f$	Serie	Notas
	Tapa del canal $\omega_s$	Fondo del canal $\omega_f$			
b=15 cm h=7.5cm	4.8	-3.0	1.6	A1	Valor óptimo para b/h=2.0 (Booij, 1994)
	4.2	-3.0	1.4	A2	
	-1.2	1.0	1.2	A3	Valor óptimo para b/h=1.93 (Gharabaghi et al., 2007)
	-1.8	1.0	1.8	A4	
	<b>4.5</b>	<b>-3.0</b>	<b>1.5</b>	<b>A5</b>	<b>Valor óptimo del presente trabajo</b>
b=15 cm h=10 cm	2.7	-1.5	1.8	B1	Valor óptimo para b/h=1.5 (Booij, 1994)
	<b>2.4</b>	<b>-1.5</b>	<b>1.6</b>	<b>B2</b>	<b>Valor óptimo del presente trabajo</b>
	<b>-3.0</b>	<b>1.8</b>	<b>1.66</b>	<b>B3</b>	<b>Valor óptimo del presente trabajo</b>
	-3.0	1.75	1.70	B4	

Para calcular la velocidad de caída de los flocs se utilizó la técnica de velocimetría por rastreo de partículas (PTV), en combinación con la técnica de separación de fases, para ello se desarrolló una herramienta computacional, que aplica los considera para el procesamiento de las imágenes el algoritmo de PTV y para la determinación de las velocidades y caracterización de los flocs se utiliza la

separación de fases, en Salinas 2014, se describe claramente la técnica desarrollada. Esta combinación de técnicas resultó ser ideal para determinar la velocidad de partículas dispersas en un sistema bifásico (Díaz, 2014).

## RESULTADOS

Para determinar las relaciones óptimas de velocidad entre el canal circular y la tapa superior, se utilizó la herramienta de análisis paramétrico que posee ANSYS-FLUENT, se realizaron los experimentos planteados, obteniendo resultados para cada caso. En el siguiente apartado, se muestran los resultados de forma gráfica, para las condiciones óptimas para dos tirantes considerados en el canal, para 7.5 cm y para 10 cm. Se destaca principalmente los campos y perfiles de velocidad, distribución del flujo secundario. Así mismo, se realiza la comparación con los campos de velocidad obtenidos aplicando la técnica de PIV.

Para la sección de canal  $b=15\text{cm}$  y  $h=7.5\text{cm}$ , la relación óptima de velocidad angular del fondo (canal) y de la superficie (tapa) fue de  $\omega_s/\omega_f = 1.5$ , correspondiente al escenario A5. Mientras que para la sección de canal  $b=15\text{cm}$  y  $h=10\text{ cm}$ , la relación óptima de velocidad angular del fondo (canal) y la superficie (tapa) fue de  $\omega_s/\omega_f = 1.6$ , correspondiente al escenario B3.

En la figura 9 se muestra la ubicación de los perfiles de velocidad analizados tanto para el modelo numérico como para la experimentación en el canal, así como las secciones donde se muestra el corte transversal para el análisis del flujo secundario. De la figura 10 a la 12 se muestran los resultados de la simulación con ANSYS-FLUENT, para el escenario A5 y B3; en la Figura 10, se muestran los perfiles verticales de velocidad para el escenario A5 o los cuales son prácticamente simétricos en ambos sentidos del flujo, es decir cuentan con la misma velocidad tanto en la tapa como en el fondo, pero en direcciones opuestas.

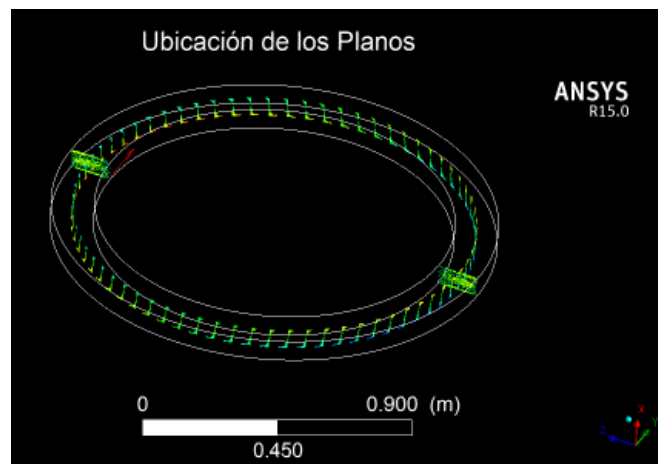


Figura 9. Ubicación espacial de los Perfiles de velocidad en 3D dentro del tanque.

En la Figura 11 se muestran los perfiles verticales de velocidad del escenario B3 en este caso el tirante de agua es de 10 cm, lo que genera que los perfiles de velocidad no sean simétricos, ya que tienen una mayor tendencia en la zona del fondo en comparación con la zona cercana a la superficie. Sin embargo, los campos de velocidad radial (flujo secundario) en ambos casos presentan una

mayor área horizontal con comportamiento de flujo homogéneo como en el caso A5. Esto impide la presencia y generación de turbulencia, fenómeno que afecta el depósito de sedimentos en el fondo del canal. Estos escenarios son idóneos para llevar a cabo el estudio de deposición y erosión de sedimentos. Así como el análisis de los procesos de floculación de sedimentos finos.

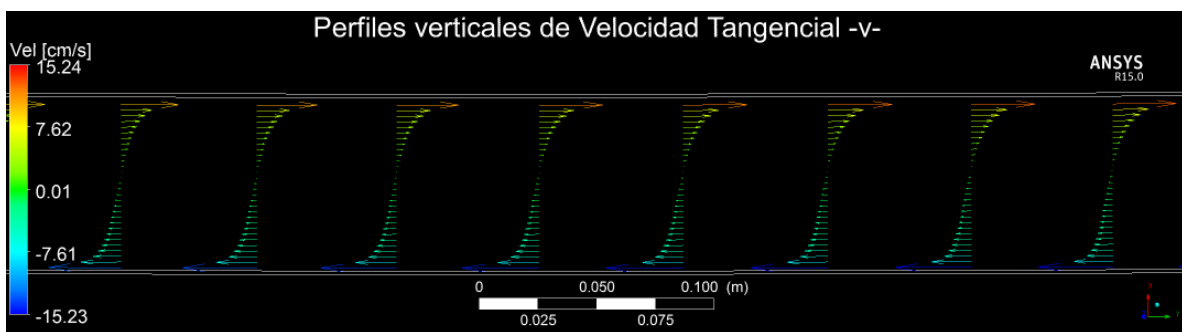


Figura 10. Perfiles de velocidad de velocidad para el escenario A5,  $\omega_s=4.5$  rpm,  $\omega_r=-3.0$  rpm;  $\omega_s/\omega_r=1.5$ ;  $b=15$ cm,  $h=7.5$ cm.

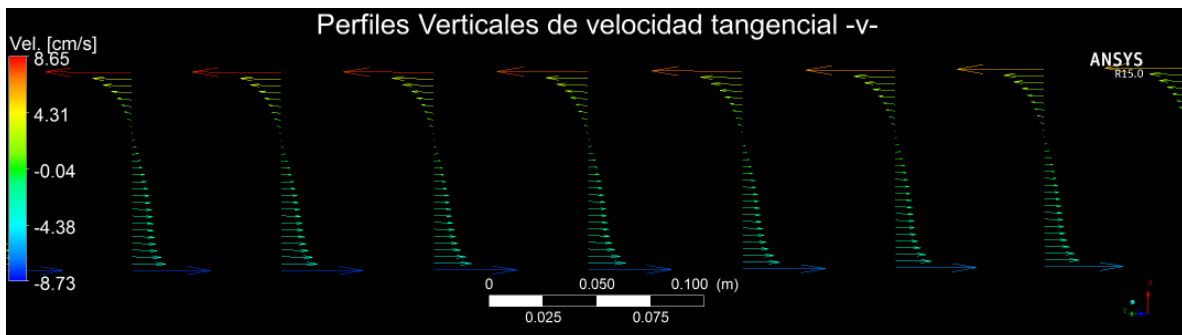


Figura 11. Perfiles de velocidad de velocidad para el escenario B3,  $\omega_s=-3.0$  rpm,  $\omega_r=1.8$  rpm;  $\omega_s/\omega_r=1.66$ ;  $b=15$ cm,  $h=10$ cm.

Esto indica que se mantiene una velocidad constante y similar tanto en la zona cercana a la superficie como en la zona adyacente al fondo del canal. Así, en la altura media del canal se logra tener velocidades tangenciales cercanas a cero, lo cual beneficia la disminución del flujo secundario. En la figura 12, se pueden observar los flujos secundarios en un corte transversal del canal y se observa claramente las dos zonas de flujo, donde la mayor área transversal, contiene velocidad constante, lo que permite considerar tasa de corte constante beneficiando los procesos de coagulación, y esto ayuda a calcular indicadores para determinar el instante en el cual comienza el depósito de sedimentos entre la interface agua-sedimento.

Para validar los resultados obtenidos con la simulación numérica, en la figura 13 se muestran los campos de velocidad obtenidos de forma experimental con la técnica PIV, y se puede observar que para los dos escenarios óptimos, existe el mismo comportamiento que el obtenido numéricamente, sin embargo, de forma experimental se observa que existe mayor inestabilidad en el flujo, presentado zonas de turbulencia y remolinos al momento en que el flujo cambia de dirección, creando zonas de velocidades muy bajas cercanas a cero. Así mismo, en la figura 14 se observa las líneas de corriente y se observa que el flujo cercano al fondo del canal es prácticamente uniforme, sin presencia de turbulencia, lo que ayuda a la sedimentación de partículas.

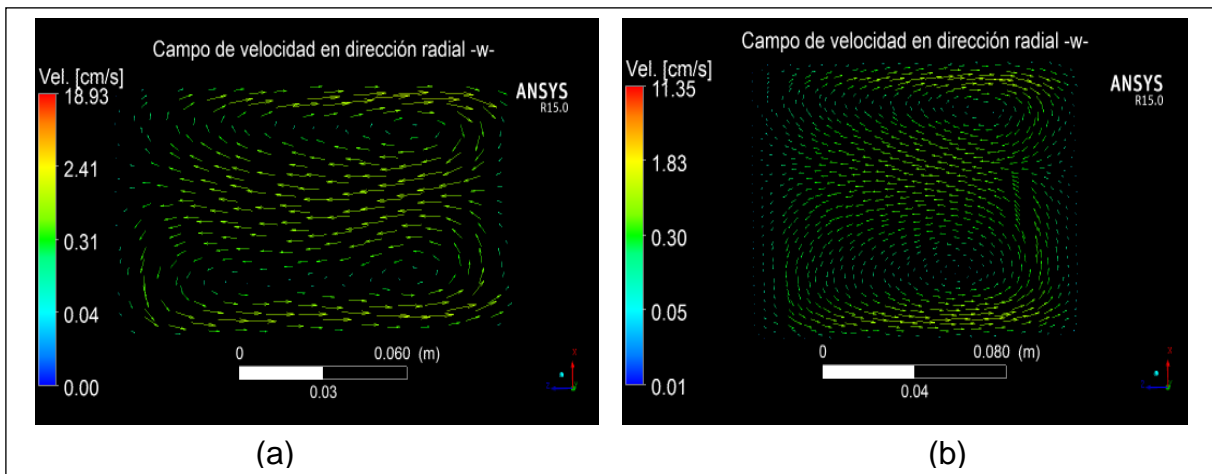


Figura 12. Vectores de velocidad radial, para los diferentes escenarios. a). Escenario A,  $\omega_s=4.5$  rpm,  $\omega_r=-3.0$  rpm;  $\omega_s/\omega_r=1.5$ ;  $b=15$ cm,  $h=7.5$ cm.; b). Escenario B,  $\omega_s=-3.0$  rpm,  $\omega_r=1.8$  rpm;  $\omega_s/\omega_r=1.66$ ;  $b=15$ cm,  $h=10$ cm.

También es importante destacar, que a medida que se aumenta el tirante la zona de baja turbulencia es mayor en el fondo del canal que en la superficie (figuras 13 y 14). Otro fenómeno a destacar, es que a medida que la relación  $\omega_s/\omega_r$  aumenta, se presenta una mayor zona de inestabilidad también si se aumenta el tirante, como lo observado en la figura 14b, donde la relación es de 1.66 y el tirante de 10 cm. Como parte de la validación de los resultados del canal y la certeza para su aplicación al estudio de la sedimentación con tasa de corte constante, se realizó la comparación de los perfiles de velocidad para los dos escenarios óptimos (A5 y B3), y se observa en las figura 15 y 16, que el comportamiento del flujo es prácticamente el mismo.

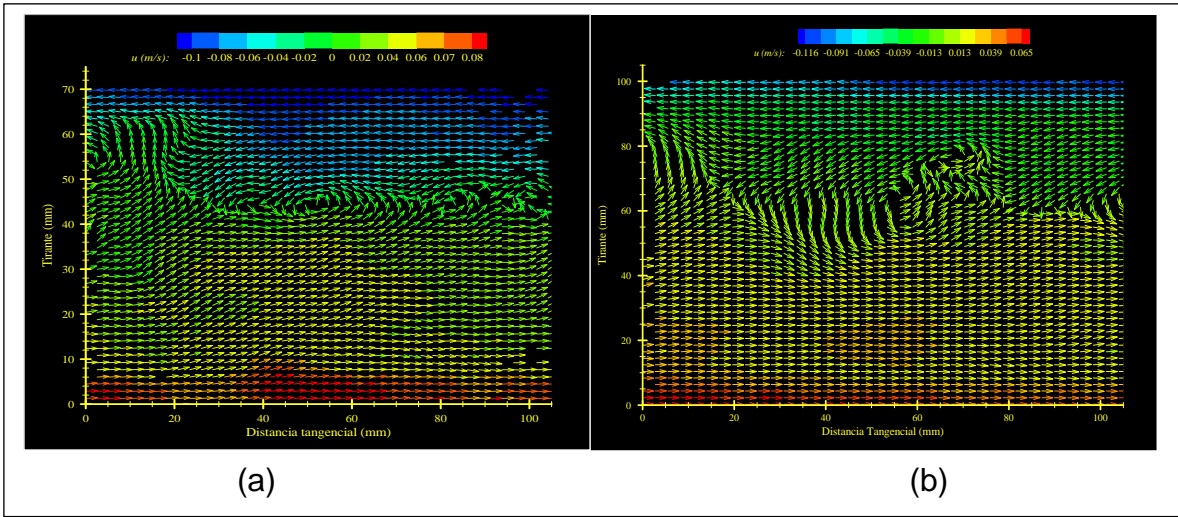


Figura 13. Campos de velocidad tangencial utilizando PIV, para los diferentes escenarios óptimos. a).  $\omega_s=4.5$  rpm,  $\omega_f=-3.0$  rpm;  $\omega_s/\omega_f=1.5$ ;  $b=15$ cm,  $h=7.5$ cm.; b).  $\omega_s=-3.0$  rpm,  $\omega_f=1.8$  rpm;  $\omega_s/\omega_f=1.66$ ;  $b=15$ cm,  $h=10$ cm.

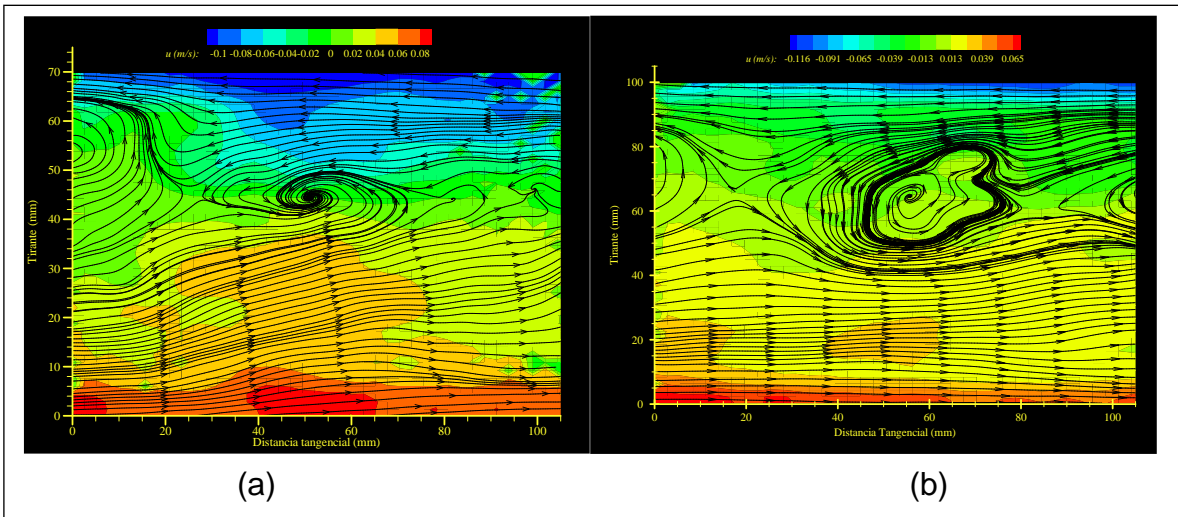


Figura 14. Líneas de corriente de velocidad PIV, para los diferentes escenarios óptimos. a).  $\omega_s=4.5$  rpm,  $\omega_f=-3.0$  rpm;  $\omega_s/\omega_f=1.5$ ;  $b=15$ cm,  $h=7.5$ cm.; b).  $\omega_s=-3.0$  rpm,  $\omega_f=1.8$  rpm;  $\omega_s/\omega_f=1.66$ ;  $b=15$ cm,  $h=10$ cm.



Existe diferencia entre el resultado numérico (CFD) y el experimental (PIV), la variación en la superficie del canal es en promedio de un 15% y 6 % para el escenario A5 y B3 respectivamente, mientras que para el fondo la diferencia es de 11 % y 2 % respectivamente. Se observa entonces que a medida que se aumenta el tirante y reduce la velocidad de rotación del canal, la velocidad en el fondo es más uniforme y no existe diferencia entre lo numérico y lo experimental.

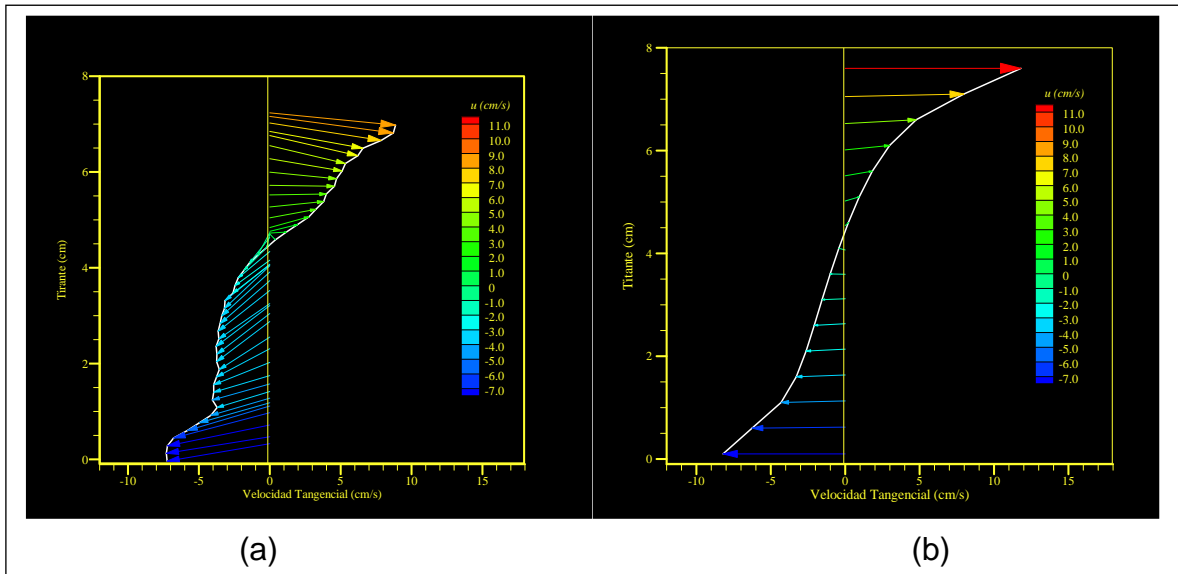


Figura 15. Comparación de los perfiles de velocidad, para el escenario óptimo A5, con  $\omega_s=4.5$  rpm,  $\omega_f=-3.0$  rpm;  $\omega_s/\omega_f=1.5$ ;  $b=15$ cm,  $h=7.5$ cm; a) Datos experimentales (PIV), b). Simulación numérica (CFD)

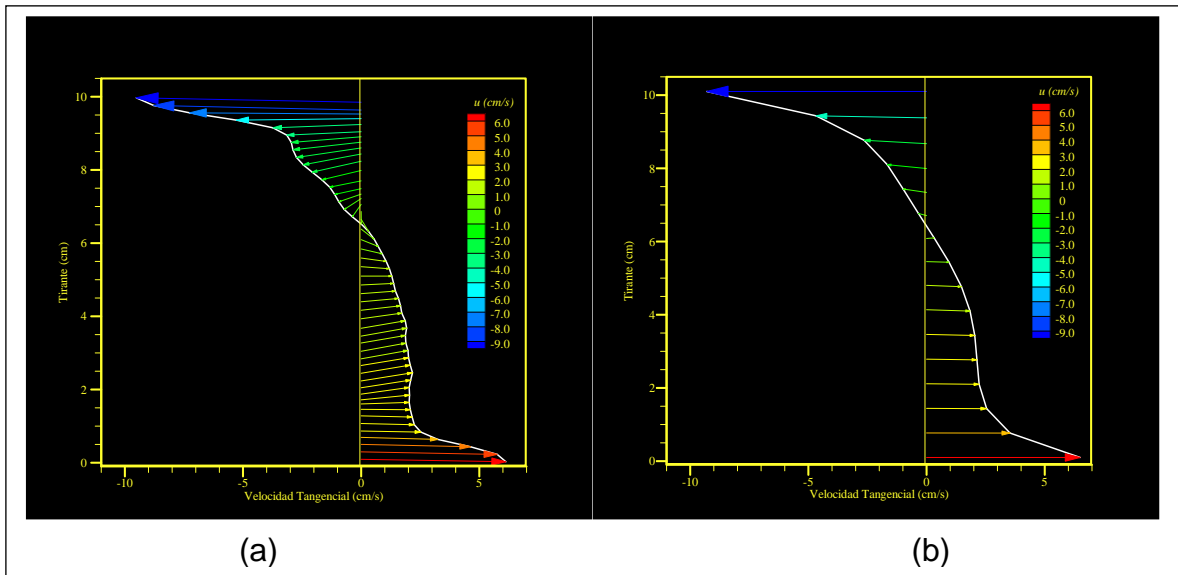


Figura 16. Comparación de los perfiles de velocidad, para el escenario óptimo B3, con  $\omega_s = -3.0$  rpm,  $\omega_f = 1.8$  rpm;  $\omega_s/\omega_f = 1.66$ ;  $b = 15$  cm,  $h = 10$  cm; a) Datos experimentales (PIV), b). Simulación numérica (CFD).

## APLICACIÓN DEL CANAL CIRCULAR AL ANÁLISIS DE FLOCS

Como se ha descrito en el presente trabajo, la principal utilidad del canal circular de flujo anular es el estudio de los sedimentos cohesivos, sin embargo, este será de gran utilidad al área de hidráulica fluvial, debido a que puede ser aplicado a la caracterización de partículas sedimentarias, a la optimización de sistemas de sedimentación en plantas de tratamiento, al estudio de sedimentos cohesivos en ríos y estuarios, y otra área importante es al estudio del comportamiento de los sedimentos provenientes de los sistemas de recirculación para el cultivo de peces

(acuicultura), con la finalidad de minimizar costos en la eliminación de los sedimentos dentro del tanque de recirculación.

En este trabajo, se inició con el funcionamiento del canal circular, en la figura 17, se muestra el canal con agua residual proveniente de la planta de tratamiento del CIRA, y en la figura 18 se muestra las imágenes obtenidas con el sistema óptico de PIV, es importante mencionar que esta etapa de experimentación y caracterización flocs dentro del canal, se encuentra en etapa de desarrollo.

En la figura 18a se observa una imagen completa, mientras que en la figura 18b, se muestra una imagen donde se ve claramente la formación de flocs, así mismo se distinguen partículas primarias.

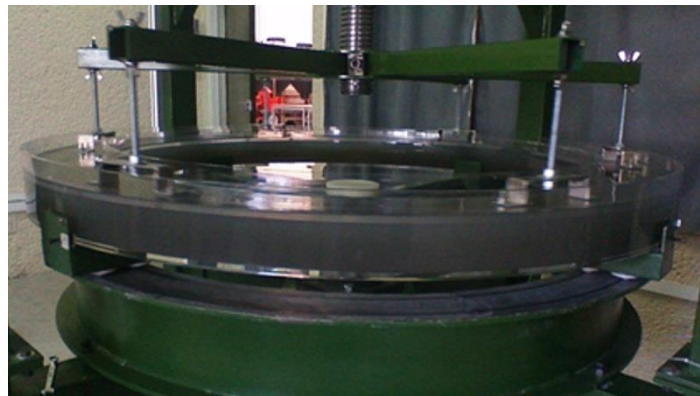


Figura 17. Canal circular, con agua residual, en el proceso de coagulación-floculación.

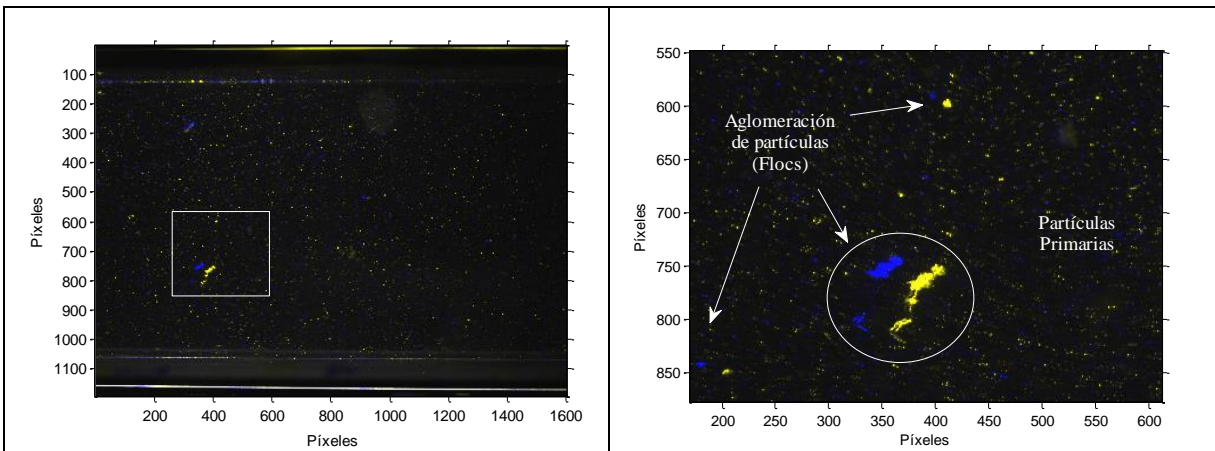


Figura 17. Imágenes de flocs, producto del uso de agua residual en el canal circular.

Dado que se inicia con la etapa de experimentación, previo al uso del canal y para la determinación, de la velocidad de caída de los flocs, se utilizó una columna experimental, esto con la finalidad de validar la técnica óptica de PTV y el desarrollo de la herramienta computacional, en las figuras 19 se muestran los resultados experimentales obtenidos con PTV de velocidad vs. diámetro en diferentes momentos durante un experimento de 40 minutos. La línea continua representa el mejor ajuste de una ecuación de Stokes modificado que tiene en cuenta la ecuación presentada en Moreno (2013), esta ecuación considera la ecuación propuesta por Lau y Krishnapan (1992), donde considera como parámetro importante la densidad del floc; la ecuación considerada como modelo de ajuste es:

$$W_s = \left( \frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \right) D^2 \exp(-bD^c - 14.42) \quad (8)$$

Donde  $\rho_f$ ,  $\rho_w$ ,  $\rho_p$  son densidades de floc, agua y partículas primarias,  $D$  es el diámetro floc y, los parámetros  $b$  y  $c$  dependen del tipo de floc y de la tasa de corte aplicada. Los valores de  $b$  y  $c$  que mejor se ajustaron a los datos son  $b=0.004$  y  $c=1.1$ .

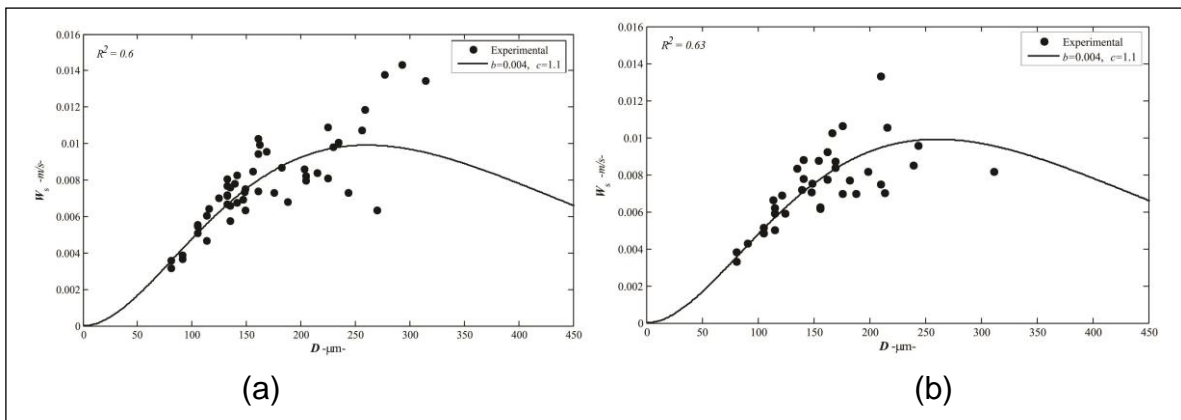


Figura 19. Curvas de ajuste de velocidad de caída de flocs obtenidas con PTV; a) curva de ajuste para  $t=20$  min, b). curva de ajuste para  $t=30$  min.

A pesar que los resultados obtenidos en la columna experimental, Moreno (2013) determino aplico la técnica de PTV para determinar la velocidad de sedimentación de flocs, dentro de un tanque de recirculación para acuicultura, con sedimentos provenientes alimentos para peces, sin embargo obtuvo mucha dispersión de datos, debido principalmente a la falta de control de la tasa de corte. También el modelo aplicado no utiliza la dimensión fractal, situación que con el canal circular

propuesto se pretende controlar y validar los modelos para determinar la velocidad de sedimentación de partículas cohesivas y con las técnicas ópticas determinar la dimensión fractal, de forma experimental y sea en dos o tres dimensiones.

## **CONCLUSIONES**

El estudio de canales anulares ayuda a conocer las propiedades del flujo que intervienen en la floculación, arrastre y sedimentación de sólidos suspendidos.

El uso de la simulación numérica (CFD) permite obtener los parámetros hidrodinámicos en 3D, que sirven como base para el análisis del comportamiento del flujo y tasas de corte para el análisis del comportamiento de sedimentos cohesivos.

Las condiciones de operación de canal circular de flujo anular idóneas fueron:  $\omega_s/\omega_r = 1.5$  para la sección del canal  $b=15\text{cm}$  y  $h=7.5\text{cm}$  y  $\omega_s/\omega_r = 1.6$  para la sección del canal  $b=15\text{cm}$  y  $h=10\text{ cm}$ . Estas condiciones fueron obtenidas de la simulación y validadas con la técnica PIV, lo que garantiza que el diseño del canal es adecuado para los fines propuestos.

El uso de CFD, permite reducir costos y ajustar las condiciones de diseño de cualquier equipo hidráulico, y con ello construir los prototipos de una manera segura y confiable en los resultados a obtener

También se demuestra que el uso de técnicas ópticas como PIV, permitió validar el modelo numérico utilizado y con ello garantizar el buen funcionamiento del canal circular para su uso en el estudio de sedimentos cohesivos

El canal circular propuesto, permitirá desarrollar amplia investigación en los procesos de floculación que minimizar los costos en los sistemas de tratamiento principalmente en el uso de coagulantes. Así como en el estudio de sedimentos cohesivos en ríos y en sistemas de recirculación para acuicultura.

## REFERENCIAS

- **Adrian, R.**, 1991. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annu Rev Fluid Mech* 23: 261-304.
- **Booij, R.** (1994). Measurements of the flow field in a rotating annular flume. *Communications on hydraulic and geotechnical engineering*, Report No. 94-2. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, GA Delft, The Netherlands.
- **Díaz, G., V.E.** (2014). “Aplicación de técnicas ópticas para la determinación en 3D de la velocidad de sedimentación de partículas no cohesivas, en fluidos en movimiento considerando separación de fases”, Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- **El Ganaoui, O., Schaaff, E., Boyer, P., Amielh, M., Anselmet, F., Grenz, C.**, (2004). The deposition and erosion of cohesive sediments determined by a multi-class model. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 60, 457-475.
- **Garcia A., J., Droppo I., Krishnappan B., Trapp B y Jaskot C.** (2011). Erosion characteristics and floc strength of Athabasca River cohesive sediments, *Journal of Soil and sediments*, 11 (2).

- **Gharabaghi, B., Inkratas, C., Krishnappan, B.G. and Rudra, R.P.** (2007). Flow Characteristics in a Rotating Circular Flume. *The Open Civil Engineering Journal*, 1, 30-36.
- **Graham, D.I., James, P.W., Jones, T.E.R., Davies, J.M., Delo, E.A.,** (1992). Measurement and prediction of surface shear stress in annular flume. *J. Hydraul. Eng.* 118, 1270–1286.
- **James, P. W., Jones T. E. R., and Stewart D. M.,** (1996). Numerical and experimental studies of annular flume flow, *Appl. Math. Modelling* 1996, Vol. 20, pp. 225-231
- **Khalitov, D. A. y Longmire, E. K.** (2002). Simultaneous two-phase PIV by two-parameter phase discrimination. *Experiments in fluids*, Vol. 32, pp. 252-268.
- **Krishnappan, B. G.,** (2007). Recent advances in basic and applied research in cohesive sediment transport in aquatic systems. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34, 731-743.
- **Lau, Y.L., Krishnappan, B.G.,** (1992). Size distribution and settling velocity of cohesive sediments during settling. *J. Hydraul. Res.*, 30(5), 673–684.
- **Lopes, J. F., Dias, J. M., Dekeyser, I.,** (2006). Numerical modelling of cohesive sediments transport in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal. *Journal of Hydrology*, 319, 176-198.
- **Moreno, G., J.,** (2014), “Determinación Experimental de la velocidad de caída de sedimentos cohesivos en suspensión,” Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- **Parchure, T. M., Mehta, A. J.,** (1985). Erosion of Soft Cohesive Sediment Deposits. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(10), 1308-1326.
- **Salinas, T, H. y García A., J. A.** (2011). Fórmula experimental para la velocidad de caída de sedimentos en flujo transversal. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México*, vol. II, núm. 2, pp., 175-182.
- **Salinas, T., H.** (2007). “Determinación de parámetros para flujo bifásico, sólido-líquido, aplicando técnicas ópticas”. Tesis de Doctorado en Ingeniería, Ciencias del Agua. CIRA, Universidad Autónoma del Estado de México.
- **Teisson, C.,** (1997). A review of cohesive sediment transport models. In: Burt, N., Parker, R., Watts, J. (Ed.) *Cohesive Sediments*. John Wiley & Sons Ltd.