Caracterización cinética e hidrodinámica del fluido en un floculador hidráulico tipo Alabama localizado en la Ptap "El Arroyo" en Santander de Quilichao, Cauca

Kinetic and hydrodynamic characterization of the fluid in a hydraulic flocculator type Alabama located in the Ptap "El Arroyo" in Santander de Quilichao, Cauca

https://doi.org/10.17981/ladee.01.01.2020.4

Fecha de Recibido: 21/9/2020 Fecha de Aceptado: 23/10/2020

Andrés Mauricio Zapata-Rivera 🗈

Universidad de la Costa. Barranquilla (Colombia) azapata13@cuc.edu.co

Alexander Gonzalías-Manjarrés 回

Universidad del Valle. Cali (Colombia) alexander.gonzalias@correounivalle.edu.co

Para citar este artículo:

A. Zapata-Rivera & A. Gonzalías-Manjarrés, ""Caracterización cinética e hidrodinámica del fluido en un floculador hidráulico tipo Alabama localizado en la Ptap "El Arroyo" en Santander de Quilichao, Cauca", *LADEE*, vol. 1, no. 1, pp. 43–54, 2020. https://doi.org/10.17981/ladee.01.01.2020.4

Resumen— Se caracterizó la energía cinética y la hidrodinámica del fluido en un floculador hidráulico tipo Alabama de la PTAP EL Arroyo del municipio de Santander de Quilichao (Cauca). Para ello, se realizó la evaluación experimental mediante tres ensayos de trazadores complementándolos con la simulación a través de un modelo CFD en tres dimensiones (CFD-3D). Se utilizó un enfoque Euleriano junto con un modelo de turbulencia "Viscous-estándar k-e" para caracterizar el fluido, el modelo se implementó usando el software Ansys Inc. Fluent[®] (V. 16.1) en una estación de trabajo Dell Precision TX3500. La geometría correspondió a un modelo CAD con las dimensiones reales del floculador y se desarrolló usando el programa Ansys Design Modeller[®]. La malla para las simulaciones fue discretizada con 20795 elementos hexaédricos usando Ansys Inc® meshing software (V. 16.0). Los resultados mostraron que el floculador opera en condiciones que afectan su desempeño desde el punto de vista hidrodinámico y cinético del fluido, que funciona como un reactor no ideal presentando un flujo mezclado con tendencia a flujo pistón, además, la existencia de cortos circuitos y zonas muertas que disminuyen su eficiencia y deterioran la calidad de los flocs. Los resultados de la simulación se proponen como complementarios al clásico ensavo de trazadores y a la evaluación de este tipo de unidades propuesta en el RAS 2010. Esto, gracias a que las simulaciones computacionales mostraron en detalle las causas y las zonas del floculador donde se presentaban las fallas hidráulicas adversas al buen funcionamiento de este. En conclusión, con la ayuda del modelo se propusieron acciones de mejoramiento como el cierre de las ventanas de limpieza durante la operación del floculador, evitar cambios bruscos en los caudales de operación y la instalación de codos de dirección del flujo en los compartimentos del mismo.

Abstract— The kinetic energy and hydrodynamics of the fluid were characterized in a hydraulic flocculator type Alabama of the PTAP El Arroyo of the municipality of Santander de Quilichao (Cauca). For this purpose, the experimental evaluation was carried out by means of three tracer tests complemented with the simulation through a three-dimensional CFD model (CFD-3D). An Eulerian approach was used along with a "Viscous-k-standard" turbulence model to characterize the fluid, the model was implemented using Ansys Inc. Fluent[®] software (V. 16.1) on a Dell Precision TX3500 workstation. The geometry corresponded to a CAD model with the actual dimensions of the flocculator and was developed using the Ansys Design Modeller® program. The mesh for the simulations was discretized with 20795 hexahedral elements using Ansys Inc® meshing software (V. 16.0). The results showed that the flocculator operates under conditions that affect its performance from the hydrodynamic and kinetic point of view of the fluid, that it functions as a non-ideal reactor presenting a mixed flow with a tendency to piston flow, and also the existence of short circuits and dead zones that decrease its efficiency and deteriorate the quality of the flocs. The results of the simulation are proposed as complementary to the classic tracer test and the evaluation of this type of unit proposed in the RAS 2010. This, thanks to the fact that the computer simulations showed in detail the causes and areas of the flocculator where the hydraulic failures adverse to the proper functioning of the flocculator occurred. In conclusion, with the help of the model, improvement actions were proposed such as closing the cleaning windows during flocculator operation, avoiding abrupt changes in operating flows and installing flow direction elbows in the flocculator compartments.

Palabras clave— Dinámica de fluidos computacional; agua potable; floculación; trazador; zonas muertas; corto circuitos; planta de tratamiento

Keywords— Computational fluid dynamics; drinking water; flocculation; tracer; dead zones; short circuits; treatment plant

© The author; licensee Universidad de la Costa - CUC. LADEE vol. 1 no. 1, pp. 43-54. Julio - Diciembre, 2020 Barranquilla. e-ISSN 2744-9750 (En línea)



INTRODUCCIÓN

La floculación es uno de los procesos prioritarios en la potabilización de agua, se lleva a cabo después de la coagulación y consiste en la agitación lenta del volumen de agua para lograr la aglomeración de las partículas en suspensión en unas de mayor tamaño llamadas flocs. En el proceso de floculación son relevantes la forma de producir la agitación, los gradientes de velocidad y el tiempo de retención [1]. Las unidades donde se lleva a cabo la floculación son conocidas como floculadores y se clasifican según la potencia utilizada para producir la agitación en hidráulicos, mecánicos o neumáticos. Los hidráulicos a su vez se clasifican según el sentido del flujo en: horizontales o verticales [2]. El floculador tipo Alabama, es una variante de los floculadores hidráulicos verticales, en ellos se direcciona el flujo de agua hacia arriba usando un codo de 90° y retomándola por el fondo. Son una solución recomendable en plantas con capacidad de tratar caudales superioriores a 50 l.s⁻¹, esto gracias a que tienen menor área que los floculadores de flujo horizontal lo que facilita que sus diseños sean más compactos.

Por otra parte, los floculadores tipo Alabama son unidades sensibles a las variaciones de caudal por lo que fácilmente se pueden generar cortos circuitos y zonas muertas que deterioran el proceso de floculación y disminuyen su eficiencia [3]. Por consiguiente, la correcta operación y funcionamiento de estas unidades es fundamental para la obtención de un agua de calidad que cumpla con los estándares de consumo y para el apropiado funcionamiento de la planta de potabilización.

De esta forma, la hidrodinámica y la cinética del fluido en los floculadores, en este caso particular del tipo Alabama, son aspectos importantes que impactan su desempeño y que a su vez se ven afectadas por patrones de recirculación del fluido, zonas muertas y cortos circuitos. Por estas razones, el diseño y la operación de un floculador tipo Alabama, exigen un detallado conocimiento de estos fenómenos, pues los criterios de diseño usados normalmente, no tienen una base experimental o soporte científico acreditado [4], [3], lo que hace indispensable la aplicación de nuevas herramientas que faciliten su conocimiento. En este sentido, una de las herramientas más poderosas, eficiente, eficaz y que ha venido perfeccionándose en los últimos 20 años, son los modelos computacionales, especialmente, aquellos que utilizan técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). La CFD es una herramienta de modelación que ha ayudado a comprender los fenómenos hidrodinámicos y cinéticos relacionados con los flujos de agua en distintas unidades de tratamiento, con el uso de estos modelos se han simulado flujos en procesos de almacenamiento de agua potable [5], mezcla rápida [6], clarificación [7] y depuración de agua residual [8], en los cuales se han resaltado las bondades que se obtienen con el uso de la CFD. Por las razones expuestas, el objetivo de este estudio fue representar a través de un modelo CFD en 3 dimensiones (CFD-3D) el comportamiento hidrodinámico y cinético del fluido en un floculador hidráulico tipo Alabama localizado en la PTAP "El Arroyo" del municipio de Santader de Quilichao (Cauca, Colombia). El modelo CFD se desarrolló usando el software Ansys Inc. Fluent[®] (V. 16.1) en una estación de trabajo Dell Precision TX3500 procesador Intel Xeon X3470 (8MB Caché, 2.93GHz, Turbo, HT), se resolvieron las ecuaciones de masa, momento y cantidad de movimiento, se encontró que el modelo CFD-3D tuvo un buen ajuste al comparar los datos experimentales con los simulados.

Metodología

A. Localización y descripción del floculador

La unidad de floculación esta localizada en las instalaciones de la PTAP "El Arroyo", en el municipio de Santander de Quilichao (Cauca), en las coordenadas 3°0'38" latitud norte y 2°23'30" latitud oeste, a una altura de 1112 metros sobre el nivel del mar. En esta PTAP se realiza la potabilización del agua mediante un sistema convencional, en el que se realizan los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, suministrando agua tratada para el 100 % de la cabecera municipal del municipio, lo que representa aproximadamente 55000 habitantes. La floculación en la PTAP "El Arroyo" se realiza en dos floculadores hidráulicos (1-2) de flujo vertical tipo Alabama con entrada lateral del agua al floculador en el fondo. Los floculadores no tienen codos para proyectar el agua hacia arriba pero en su lugar, se construyeron recámaras de dirección de flujo, están constituidos por nueve cámaras en serie unidas entre sí por la parte inferior a través de pasa muros, en la recamara final el agua sale por la parte superior opuesta a la entrada, estos floculadores trabajan a una capacidad de 125 l.s⁻¹ cada uno [9]. En Santander de Quilichao la calidad del agua a la salida de la planta de potabilización cumple con los requerimientos de ley, sin embargo, debido al mal funcionamiento de los floculadores. La planta presenta dificultades técnicas como el lavado

repetitivo de los filtros, altos consumos de cloro que favorecen el deterioro de tuberías y redes de distribución, y un incremento en los costos para el tratamiento del agua. Por lo tanto, se ha considerado como prioridad el proceso de floculación, esto se debe a que, al optimizar este proceso se espera mejorar la eficiencia de operaciones como la sedimentación y la filtración, disminuir las pérdidas de agua por el lavado repetitivo de los filtros y una disminución en las cantidades de cloro usado para la desinfección. Este estudio se desarrolló en el floculador dos.

B. Ensayos de trazadores

Los ensayos de trazadores se han utilizado para validar los modelos CFD en los que se representa el comportamiento cinético e hidrodinámico del fluido en unidades de tratamiento de agua [10], [11]. Por lo tanto, en este estudio para conocer el comportamiento hidrodinámico del floculador dos de la PTAP "El Arroyo", se realizaron tres ensayos de trazadores para los tres caudales de operación de la planta 180 l.s⁻¹, 230 l.s⁻¹ y 250 l.s⁻¹, lo que representa caudales unitarios para el floculador dos de: 90 l.s⁻¹, 115 l.s⁻¹ y 125 l.s⁻¹ respectivamente. Los ensayos de trazadores se realizaron siguiendo la metodología sugerida por [12], para ello se usó como trazador 2,0 kg cloruro de sodio diluidos en 10 litros de agua cruda de la planta. La solución fue adicionada en forma de pulso (2 s) lo más cerca posible a la entrada del floculador y registrando la conductividad a la salida de la unidad cada minuto, con un medidor de conductividad Pocket Pro marca Hach (Colorado, USA).

C. Especificaciones del modelo CFD

1) Geometría y dicretización del floculador dos

Para el dominio del modelo, se desarrolló una geometría 3D en un solo cuerpo con las dimensiones reales levantadas en campo. Posteriormente se seccionó con el propósito de mejorar las condiciones para el siguiente paso (creación de la malla), obteniéndose como resultado una geometría con 27 cuerpos, 218 caras, 492 lados y 328 vértices, con un volumen de 150.11 m³ y un área total de 393.61 m², además fueron seleccionadas y nombradas las caras de entrada (Inlet) y de salida (Outlet) del agua. Para la geometría se usó el programa Design Modeller[®], incluido en Ansys Workbench (Versión 16.1). En la Fig. 1 se muestra la geometría del floculador dos en 3D.





Fig. 1. Vista 3D de la geometría. Fuente: Autores.

Para la discretización se empleó el método de volúmenes finitos. Se crearon tres mallas discretizando el dominio computacional (geometría) del modelo, conformando un mallado de elementos hexaédricos teniendo en cuenta los criterios de asimetría y calidad ortogonal para definir la calidad de los elementos de las mallas [13]. Estos fueron verificados por el método del determinante con valores superiores a 0.6 (mínimo requerido 0.3). Se obtuvieron 4683 elementos para la malla gruesa (malla 1), 20795 elementos para la malla media (malla 2) y 37382 elementos para la malla fina (malla 3). En la Tabla I se presentan las características de las mallas empleadas en el análisis de independencia de malla.

	A málicia	Malla			
	Analisis	Gruesa	Media	Fina	
Calidad ortogonal	Número de Elementos	4666	20722	37310	
	Porcentaje	99.64	99.65	99.80	
	Clasificación	Excelente	Excelente	Excelente	
Oblicuidad (Skewness)	Número de Elementos	4596	20312	37159	
	Porcentaje	98.14	97.68	99.40	
	Clasificación	Excelente	Excelente	Excelente	

 Tabla I.

 Características de los elementos en el análisis de independencia de la malla.

Fuente: Autores.

En la Fig. 2 se muestra la malla del modelo CFD utilizada para la simulación.



Fig. 2. Malla del modelo CFD. Fuente: Autores.

2) Prueba de independencia de malla

La prueba de independencia de malla garantiza que la precisión de la solución obtenida no dependa del número y tamaño de los elementos [14]. Por lo tanto, para esta prueba se utilizó como criterio la variable velocidad del fluido en un punto a la salida del dominio, y de esta forma hacer la comparación entre mallas y la posterior selección de la malla óptima. También, la selección de la malla dependerá de que los elementos hexaédricos que la componen cumplan con los criterios de calidad seleccionados, en este caso asimetría y calidad ortogonal, de la convergencia de la solución, el criterio de calidad de los residuales y un gasto y tiempo computacional razonables para la solución final. Siguiendo las recomendaciones de [15], la variable utilizada para comparar las tres mallas fue la velocidad del fluido (m*s⁻¹) en un punto ubicado a la salida del floculador.

3) Condiciones de frontera

Para la entrada del fluido al dominio del modelo, se utilizó la condición de frontera "velocity inlet", aquí se estableció la velocidad de entrada del fluido. En la salida se utilizó la frontera "Outflow", donde se establecen las condiciones de salida eligiendo un factor de ponderación de uno, es decir, la masa que entra es igual a la que sale. En la Tabla II se muestran los valores de las condiciones de frontera utilizados.

Zona	Frontera	Velocidad m.s ^{.1}	Reynolds Re	Intensidad de turbulencia I	Energía cinética k	Tasa de disipación de energía ε	Observaciones	
Entrada Velocity Inlet	TT 1	0.538	2189	0.061	0.0016	0.0011	Intensidad de Turbulencia: 5%	
	Velocity Inlet	0.688	2796	0.059	0.0025	0.0021	Relación de viscosidad turbulenta: 10	
		0.748	3040	0.059	0.0029	0.0026	Dh: 0.408 m	
Salida	Outflow	Factor de ponderación del caudal					Presión 101325	
		1					Pa. (atmosférica)	

TABLA II. VALORES DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA EMPLEADAS.

Fuente: Autores.

Las velocidades de entrada al modelo en la condición de frontera "velocity inlet" se calcularon con (1) para cada caudal de entrada al floculador.

$$v = \frac{Q}{A_T} \tag{1}$$

Para el cálculo del Número de Reynolds (2).

$$Re = \frac{\rho v_s D_H}{\vartheta} \tag{2}$$

Los parámetros de turbulencia fueron calculados con la relación entre la energía cinética (k) y la Intensidad de turbulencia (I), tal como se muestra en la siguiente relación (3)(4):

$$k = \frac{3}{2} (\mu a v g I)^2$$
(3)
$$I = 0.16 (Re_{\rm DH})^{-\frac{1}{8}}$$
(4)

Dónde:

Re corresponde al número de Reynolds cuya sección recta no es circular (adimensional) Posteriormente, la Tasa de disipación de energía (5) se determinó con la relación que se muestra a continuación:

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \tag{5}$$

D. Ecuaciones gobernantes

Con el modelo se resolvieron las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía hidráulica, fueron resueltas en estado transitorio y se basaron en una descripción Euleriana de las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones se muestran a continuación (6)(7):

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$
(6)

$$\rho \frac{\mathrm{Du}}{\mathrm{Dt}} = \frac{\partial (-\mathrm{p} + \tau_{\mathrm{xx}})}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \tau_{\mathrm{yx}}}{\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial \tau_{\mathrm{zx}}}{\partial \mathrm{z}} + \mathrm{S}_{\mathrm{Mx}}$$
(7)

La ecuación de momento se resolvió para los componentes "y" y "z" del sistema. La ecuación de la Conservación de la energía hidráulica (8) se parametriza de forma simple en la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial s} + g \frac{dz}{ds} = 0$$
(8)

Finalmente, las ecuaciones del modelo de turbulencia k-épsilon estándar que incluyó la ecuación para la energía cinética k y la tasa de disipación ε (9):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)
= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$
⁽⁹⁾

Y (10):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon}$$
(10)

Mayores detalles sobre las ecuaciones formuladas se pueden encontrar en la literatura [16], [13].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Estudio de trazadores y validación del campo hidrodinámico

La información de los ensayos de trazadores fue analizada a través de las curvas de distribución del tiempo de residencia para los tres caudales usando los parámetros asociados al esquema conceptual de los tiempos de residencia [9] (**Fig. 3**).



Fig. 3. Distribución del tiempo de residencia para ensayos de trazadores de los tres caudales. Fuente: Autores.

Los parámetros de los estudios de trazadores se muestran en las Tabla III y Tabla IV.

TABLA III.

DATOS DE LOS ESTUDIOS DE TRAZADORES PARA LOS TRES CAUDALES A LA SALIDA DEL FLOCULADOR DOS.

Danématua	Caudal (l.s ⁻¹)			
rarametro	90	115	125	
t _i , tiempo hasta la aparición del trazador (min)	7	6	5	
t _p , tiempo de máxima concentración (min)	24	20	19	
t_m , tiempo modal hasta aparición del 50% del trazador (min)	27.26	24.1	22.36	
to, tiempo teórico de retención (min)	28	22	20	
t _f , tiempo final (min)	66	64	50	
C_0 , conductividad inicial a la salida (μ S)	61.9	69.3	69.5	
C_p , máxima conductividad a la salida (µS)	82,6	83,4	80,5	

Fuente: Autores.

TABLA IV.

PARÁMETROS DE ESTUDIO DE TRAZADOR PARA LOS TRES CAUDALES EN EL FLOCULADOR DOS.

Criterio	Descringión	Caudal (l.s ⁻¹)			
	Descripcion	90	115	125	
$t_i^{\prime}/t_0^{\prime}$	Mide cortos circuitos. Un valor de 1 indica flujo pistón, un valor de 0 indica flujo de mezcla y si es menor a 0,3 corto circuito.	0.25	0.27	0.25	
$t_m^{\prime}/t_0^{\prime}$	Indica cortos circuitos cuando su valor es menor a 1 y zonas muertas cuando su valor es mayor a 1	0.97	1.10	1.12	
$t_{p}^{\prime}/t_{0}^{\prime}$	Indica la relación entre flujo pistón y flujo de mezcla del floculador	0.85	0.91	0.95	

Fuente: Autores.

De acuerdo con los resultados de la Tabla IV estos muestran que bajo los tres caudales de operación de la Ptap el floculador evaluado en este estudio presenta cortos circuitos hidráulicos, es decir pasos directos del fluido desde la entrada hasta la salida del floculador, lo que reduce notoriamente el tiempo mínimo de residencia dentro de la unidad requerido para que el agua tenga el tratamiento adecuado. Los números también muestran la existencia de flujo pistón y flujo mezclado con predominio del primero, también indican la existencia de zonas muertas o zonas de recirculación del fluido, las cuales aumentan la permanencia del fluido dentro de la unidad. Estas fallas hidráulicas indudablemente afectan la eficiencia del proceso de floculación, disminuyen la calidad del tratamiento y desmejoran las condiciones de operación de la planta. A pesar de su amplio uso los ensayos de trazadores han sido catalogados esencialmente como técnicas de "caja negra", los cuales brindan información muy limitada acerca de los patrones de flujo al interior de la unidad [17]. Por el contrario, los modelos que usan técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), son una potente e innovadora herramienta para estudiar de manera detallada, la hidrodinámica interna de este tipo de sistemas de tratamiento tal como se muestra mas adelante.

B. Resultados de la prueba de independencia de malla

Los resultados de la prueba de independencia de malla se muestran a continuación (Tabla V).

TABLA V.

Malla	Tipo	No de elementos	Caudal (L.s ^{.1})	Velocidad de salida (m.s ⁻¹)
1	Gruesa	4683	230	0.18
2	Media	20795	230	0.18
3	Fina	28110	230	0.19

Resultados de la prueba de independencia de malla.

Fuente: Autores.

Siguiendo la recomendación de [15] se compararon los valores de velocidad a la salida obtenidos con las mallas gruesa y media con los valores de la malla fina. Se encontró un porcentaje de error del 5% entre las mallas,

razón por la cual se seleccionó la malla media para las simulaciones finales; esto debido a que ofreció una solución aceptable con un tiempo y gasto computacional razonables.

C. Resultados del modelo CFD-3D

Los mejores resultados en términos de convergencia de la solución, número de iteraciones y estabilidad de los residuales fueron obtenidos con el modelo k-épsilon estándar, modelo basado en las ecuaciones de transporte para la energía cinética de la turbulencia (κ) y su tasa de disipación (ϵ), se ejecutaron simulaciones en estado transitorio por periodos de 1 hora, logrando perfiles de velocidad, energía cinética y turbulencia estables.

En la **Fig.** 4 se muestran las líneas de corriente predominantes en el floculador. En general se aprecia un flujo helicoidal en cada cámara, producto de que las recamaras de dirección y los pasa muros se encuentran opuestos uno al otro; estas líneas de corrientes predominantes en las cámaras del floculador tienen velocidades inferiores a los 0.2 m.s⁻¹, las cuales se encuentran fuera del rango recomendado para el agua dentro de las cámaras y que debería estar entre 0.2 - 0.6 m.s⁻¹ [18]. Asimismo, son notables siete cortos circuitos en las cámaras 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 y cuatro zonas muertas o de recirculación del fluido en las camaras 4, 5, 6 y 9, siendo las cámaras cuatro y seis las de mayor tamaño. Estas condiciones de flujo están potencialmente asociadas al flujo directo entre las ventanas de limpieza ubicadas en el fondo del floculador; en consecuencia hay dispersión de la energía cinética y cambios en la velocidad del fluido dentro de las cámaras, afectando considerablemente el comportamiento hidrodinámico de la unidad y generando un incremento en la mezcla del fluido, lo que reduce la eficiencia del proceso. La **Fig. 5** muestra con mejor detalle las zonas muertas y los cortos circuitos del floculador.



Fig. 4. Líneas de corrientes predominantes en el floculador. Fuente: Autores.



Fig. 5. Vista superior y corte transversal del floculador para ver cortos circuitos y zonas de recirculación. Fuente: Autores.

Para validar lo observado con las líneas de corriente, se analizaron los vectores de velocidad y energía cinética en las diferentes zonas del floculador. En la **Fig. 6** se aprecia como la energía cinética del fluido aumenta en las ventanas de limpieza y es menor en los pasamuros. Las gráficas permiten colegir que este aumento en la energía cinética del fluido favorece la presencia de las zonas muertas y los cortos circuitos, por ejemplo, la

mayor velocidad se presenta en la ventana de limpieza tres, por lo tanto, la mayor zona muerta se presenta en la cámara cuatro. En la Tabla VI y Tabla VII, se muestran las coordenadas cartesianas y los valores de velocidad en cada ventana de limpieza y en los pasamuros para los tres caudales de entrada al floculador. Estos valores locales fueron tomados de los resultados del modelo en puntos ubicados en el centro de cada elemento en cuestión, para su mejor apreciación los elementos se numeraron como se muestra en la **Fig. 6** los datos muestran velocidades superiores a 0.4 m.s⁻¹ en todas las ventanas de limpieza y en los pasamuros para los caudales 115 y 125 l.s⁻¹, para el caudal de 90 l.s⁻¹ se supera la velocidad de 0.4 m.s⁻¹ en los pasamuros tres, cinco, siete y ocho, las velocidades mencionadas superan la recomendación del RAS que indica que deben ser menores a 0.4 m.s⁻¹, estas velocidades provocan la ruptura del floc y reducen la eficiencia del proceso en las zonas mencionadas [4].



Fig. 6. Vectores velocidad en las diferentes zonas del floculador. Fuente: Autores.

Tabla VI. Características y valores de las velocidades en las ventanas de limpieza.									
Ventana de Área Coordenadas Velocidad para cada caudal m									
limpieza	m^2	x	У	Z	$180 \mathrm{ L.s^{\cdot 1}}$	$230 \mathrm{ \ L.s^{\cdot 1}}$	$250~\mathrm{L.s^{-1}}$		
1	0.1020	2.16	1.45	0.17	0.435^{*}	0.557^{*}	0.605^{*}		
2	0.0960	4.22	1.46	0.15	0.491*	0.628*	0.682*		
3	0.0624	6.38	1.53	0.12	0.557^{*}	0.7129*	0.775^{*}		
4	0.093	8.16	1.85	0.155	0.461*	0.5895^{*}	0.641*		
5	0.0696	10.15	0.91	0.795	0.479^{*}	0.6126*	0.660*		

* Valores por encima de lo recomendado por el RAS de 0.4 m.s $^{\cdot 1}$

0.795

0.775

0.8

 0.470^{*}

 0.516^{*}

 0.480^{*}

 0.6014^{*}

 0.6607^{*}

 0.613^{*}

 0.654^*

 0.718^{*}

 0.667^{*}

1.03

0.94

1.71

12.23

14.4

16.29

0.0870

0.0750

0.0660

6

7

8

Fuente: Autores.

TABLA VII.

CARACTERÍSTICAS Y VALORES DE LAS VELOCIDADES EN LOS PASAMUROS.

Pasa	Área	Coordenadas			Velocidad para cada caudal m.s ⁻¹		
muro	m ²	х	У	Z	$180 \mathrm{ L.s^{-1}}$	$230 \mathrm{~L.s^{-1}}$	$250~{ m L.s^{\cdot 1}}$

1	0.162	2.16	2.58	0.17	0.339	0.432^{*}	0.471*
2	0.1748	4.22	0.23	0.19	0.281	0.359	0.390
3	0.1598	6.38	2.57	0.17	0.405^{*}	0.518^{*}	0.563^{*}
4	0.1748	8.16	0.23	0.19	0.322	0.412*	0.447*
5	0.1584	10.15	2.58	0.83	0.450^{*}	0.575^{*}	0.626*
6	0.1656	12.23	0.23	0.83	0.351	0.449*	0.488*
7	0.1485	14.4	2.58	0.815	0.412*	0.526^{*}	0.572^{*}
8	0.1672	16.29	0.22	0.84	0.425^{*}	0.543*	0.591*
Salida	0.5796	18.25	2.45	3.05	0.141	0.181	0.197

* Valores por encima de lo recomendado por el RAS de 0.4 m.s $^{\cdot 1}$

Fuente: Autores.

En vista de que el flujo del agua a través de las ventanas de limpieza distorsiona las líneas de corriente deseadas y gestan las zonas muertas y los cortos circuitos, se simuló un nuevo escenario suprimiendo las ventanas de limpieza (asumiendo que estas ventanas deben estar cerradas en los momentos de operación) en la geometría del modelo CFD con el objetivo de ver de nuevo el comportamiento hidrodinámico del floculador. La **Fig. 7** permite observar esta acción sencilla y de bajo costo favorece una mayor y mejor uniformidad en las líneas de corriente predominantes, que las zonas muertas y los cortos circuitos se reducen notablemente y que es posible predecir mejoras en la eficiencia del proceso.



Fig. 7. Vista superior y corte transversal del floculador para las líneas de corrientes predominantes después de suprimir las ventanas de limpieza. Fuente: Autores.

Por lo anterior una de las recomendaciones para optimizar la planta de tratamiento de agua potable El Arroyo

es el cierre de las ventanas de limpieza durante la operación del floculador.

Conclusiones

Los resultados de los ensayos de trazadores para los caudales de operación 180, 230 y 250 l.s⁻¹, demostraron que el floculador se comporta como un reactor no ideal, oscilando entre los flujos mezclado y pistón con tendencia a este último. Los valores de los parámetros t_i/t_0 (0.25 para 90 y 125 l.s⁻¹ y 0.27 para 115 l.s⁻¹) y t_m/t_0 (0.97 para 90 l.s⁻¹, 1.10 para 125 l.s⁻¹ y 1.12 para 115 l.s⁻¹) indicaron la presencia de fallas hidráulicas como zonas muertas y cortos circuitos en la unidad de floculación, pero sin dar detalle de su ubicación. Lo anterior debido a que los ensayos de trazadores se consideran técnicas de caja negra; razón por la cual, la herramienta computacional desarrollada en este estudio es valiosa como un complemento a los clásicos ensayos de trazadores y a las evaluaciones propuestas en el RAS 2010 para este tipo de unidades. Esto, gracias a que el modelo CFD-3D mostró al detalle la ubicación de las fallas hidráulicas que afectan el desempeño del floculador. Los datos de las

simulaciones mostraron que el fluido se mueve a velocidades mayores a 0.4 m.s⁻¹ entre las ventanas de limpieza y en los pasamuros, velocidades que según el RAS 2010 pueden ocasionar el rompimiento del floc. También se encontró que dentro de las cámaras hay velocidades menores a 0.2 m.s⁻¹ lo que favorece la formación de zonas muertas dentro de estas y un aumento en el tiempo de tratamiento del agua potable. En consideración a este escenario se realizó una nueva simulación con las ventanas de limpieza cerradas y se observó la disminución de los cortos circuitos, una mayor velocidad y mejor uniformidad en las principales líneas de corriente del fluido. Gracias a lo anterior se propusieron acciones de mejora de bajo costo y alto impacto que mejoraron el desempeño del floculador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al sistema general de regalías del departamento del Cauca y al ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia y su programa de crédito-beca condonable administrado por Colfuturo por la financiación de esta investigación.

Referencias

- E. Carreño y C. Castiblanco, "Optimización del floculador tipo Alabama en la planta de tratamiento de Acuanamay con incorporación de mallas en cada una de sus cámaras", *Tesis Maestría*, UCatólica, Btá, Co, 2016. Available: https://repository. ucatolica.edu.co/handle/10983/14031
- [2] A. López. "Tipos De Floculadores", Tesis pregrado, UPC, Vup, Co, 2015.
- [3] L. De Vargas, Tratamiento de agua para consumo humano en plantas de filtración rápida. Lim, Pe: OPS/CEPIS, Tomo I. pp. 265–298, 2004.
- [4] J. Arboleda, Teoría y práctica del agua. Btá, Co: Mc Graw Hill, 2000.
- [5] C. Montoya, "Efecto del almacenamiento sobre la calidad del agua potable: evaluación experimental y simulación numérica del tanque Ciudad Jardín", *Tesis pregrado*, UniValle, Cali, Co, 2015.
- [6] S. Aponte, "Modelación de Flujo en 3-D en Procesos de Mezcla Rápida en Plantas de Tratamiento Utilizando Open FOAM". *Tesis maestría*, ECI, Btá, Co, 2017.
- [7] L. Enríquez, "Nueva configuración de un clarificador primario para el tratamiento del agua residual doméstica", *Tesis de Doctorado*, UniValle, Clo, Co, 2018.
- [8] A. Zapata & M. Peña, "CFD Model to Characterize the Physical Processes of Energy Transfer in a Secondary Facultative Lagoon", *Water Sci Technol*, vol. 82, no. 6, pp. 1–12, Sept. 2020. https://doi.org/10.2166/wst.2020.042
- [9] L. Marín y A. Zapata, Chequeo hidráulico del sistema de potabilización "PTAP El Arroyo". Análisis de vulnerabilidad e implementación de alertas tempranas para sistemas de abastecimiento de agua en el departamento del Cauca. Clo, Co: Uni-Valle, 2018.
- [10] A. Zapata & M. Peña, "CFD Model to Characterize the Transport of the Flame Retardant BDE 99 in a Secondary Facultative Lagoon", Rev. Téc. Ing., vol. 43, no. 1, pp. 41–48, Apr. 2020. https://doi.org/https://doi.org/10.22209/rt.v43n1a06
- [11] A. Alvarado, M. Vesvikar, J. Cisneros, T. Maere, P. Goethals & I. Nopens, "CFD Study to Determine the Optimal Configuration of Aerators in a Full-Scale Waste Stabilization Pond", *Water Res.*, vol. 47, no. 13, pp. 4528–4537, Sept. 2013. https://doi. org/10.1016/j.watres.2013.05.016
- [12] G. Martínez y L. Betancourth. "Evaluación de la planta de potabilización de agua, empresas públicas de Armenia-Quindío", Tesis pregrado, UNAL, Btá, Co, 2003.
- [13] ANSYS, Inc., ANSYS Fluent Theory Guide. NY, USA: Ansys, 2013. Available: http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/ notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf
- [14] G. Banda. "Computational Fluid Dynamics Modelling of Baffled Waste Stabilization Ponds", Ph.D. dissertation, Dpto. Civ. Eng., UL, LD, UK, 2007.
- [15] B. De Clercq. "Computational fluid dynamics of settling tanks: development of experiments and rheological, settling, and scraper submodels", *Ph.D. dissertation*, Ugent, GNE, Be, 2003.
- [16] H. Versteeg & W. Malalasekera, An Introduction to Parallel Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method. LDN, UK: Pearson Prentice Hall, 2007.
- [17] A. Broughton & A. Shilton, "Tracer studies on an aerated lagoon", CEUR Workshop Proceedings, 1542, Feb. 2012, pp. 33-36.

[18] RAS, Reglamento técnico del sector de agua potable y sanemiento básico. Btá, Co: CRA, 2010.

Alexander Gonzalías-Manjarrés. Nivel de formación: Pregrado. Universidad del Valle (Cali, Colombia). https://orcid.org/0000-0003-2206-5270

Andrés Mauricio Zapata-Rivera. Nivel de formación: Doctorado. Universidad de la Costa (Barranquilla, Colombia). https://orcid.org/0000-0002-6861-6771