

## Dinámica de fluidos computacional del proceso de coagulación-floculación empleando almidón de malanga como floculante para potabilización de agua

### *Computational fluid dynamics of the coagulation-flocculation process using taro starch as flocculant in water treatment*

Ana Laura Acosta-Bastar<sup>1\*</sup> y José Roberto Hernández-Barajas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

\*ana.ab19@outlook.com

#### Resumen

El objetivo de este trabajo fue realizar una simulación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para evaluar el desempeño del almidón extraído de malanga (*Colocasia esculenta*) como agente floculante en el proceso de coagulación-floculación. Se utilizó el análisis de imagen para determinar la distribución del tamaño de los floculos en las pruebas con y sin floculante. A través de modelos multifásicos se realizó la simulación CFD para visualizar el desempeño de las partículas y las variables hidrodinámicas más relevantes. La dosis óptima de sulfato de aluminio fue de 24 mg/L, que se redujo a 12 mg/L empleando 0.5 mg/L de almidón obteniendo eficiencias de remoción de 93.1% y 94.7% de turbiedad y de color. El análisis de imagen demostró que la proporción de partículas más grandes incrementa usando floculante. El modelo CFD mostró la sedimentación de partículas, demostrando su potencial en los procesos de potabilización del agua.

#### Palabras clave

Coagulación-floculación, CFD, almidón.

#### Abstract

In this research, a CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation was executed in order to study the performance of starch extracted from taro (*Colocasia esculenta*) as a flocculant in the coagulation-flocculation process. Image analysis was used to determine the floc size distribution in the tests with and without flocculant. Through multiphase models, the CFD simulation was performed to visualize the performance of the particle settling and the most relevant hydrodynamic variables. The optimal dose of aluminum sulfate was 24 mg/L, which was reduced to 12 mg/L using 0.5 mg/L

of starch, obtaining removal efficiencies of 93.1% and 94.7% of turbidity and color. Image analysis showed that the proportion of larger particles is increased by using flocculant. The CFD model showed the sedimentation of particles, demonstrating its potential in water purification processes.

## Keywords

Coagulation-flocculation, CFD, starch.

## Introducción

La coagulación-floculación es uno de los procesos más empleados en la potabilización de agua. Este proceso promueve la aglomeración de partículas coloidales con el uso de agentes metálicos. Se ha optado por el uso de agentes naturales, como los polímeros de origen vegetal. El almidón se comporta como un agente floculante que permite mejorar la eficiencia del proceso en comparación al uso único de agente coagulante. Para conocer la dosificación adecuada se lleva a cabo una técnica experimental conocida como prueba de jarras, que es un conjunto de jarras del mismo volumen en la que se adicionan diferentes dosis del agente.

El método para estudiar el comportamiento del agua y las partículas en la jarra consiste en utilizar la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Es una rama de la Mecánica que, a través de métodos numéricos, simula fenómenos de transporte relacionados al flujo de fluidos. Diversos autores han realizado investigación sobre el proceso de coagulación-floculación. Por ejemplo, Pengfei y Jun (2015) probaron el impacto de diferentes tipos de agitador en el tamaño de los flóculos mediante CFD y métodos experimentales. Por su parte, He *et al.* (2018) examinaron el efecto que la profundidad de los tanques de agitación tiene sobre el crecimiento de los flóculos, concluyendo que el efecto del crecimiento está relacionado con el mecanismo predominante.

Esta investigación aborda el estudio experimental y fluidodinámico del proceso de coagulación-floculación con el uso de almidón nativo de malanga (*Colocasia esculenta*) como agente floculante. En particular, en este estudio se analiza la reducción de la dosis de agente coagulante cuando se emplea este almidón como agente floculante. Además, se analizan las condiciones hidrodinámicas relevantes asociadas a la operación de la prueba de jarras, que son la base para el diseño de unidades de tamaño industrial.

## Materiales y métodos

### a) Síntesis de almidón nativo

El método de obtención del almidón se basó en las técnicas de diversos autores: Rodríguez Reyes (2006), Martínez Ortiz (2007), Celaya López (2013) y Olan Villatoro (2014). El tubérculo se lavó, pesó, peló y picó en cubos, se remojó en agua fría y se licuó. La pasta obtenida se filtró, el líquido cernido se conservó en un recipiente y se dejó en reposo por 3 horas. El sobrenadante se separó por decantación, obteniendo una pasta blanca que se conservó en refrigeración por 24 horas. La pasta se secó en un deshidratador a 40 °C, se molió, trituro y pasó por un tamiz No. 270 escala ASTM. El almidón obtenido se guardó en bolsas herméticas.

### b) Preparación de muestra

La muestra fue colectada en las coordenadas 17°56'39.16"N, 93° 1'0.21"O a una profundidad de 30 cm de la superficie para evitar raíces. Se prepararon las muestras de agua sintética para las

pruebas de jarras, en las que se disolvió aprox. 0.75 g de suelo en 1 L de agua para cada jarra, procurando una turbiedad inicial de 200 UTN equivalente a una alta concentración de coloides, que de acuerdo con Crittenden *et al.* (2012) es la adecuada para que los mecanismos de coagulación se efectúen correctamente. También se ajustó el pH a 7. Se midió temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos con un medidor HANNA HI98130, el color y turbiedad con un colorímetro HACH DR900 y la DQO a través de la digestión en un reactor HACH DRB200.

### c) Determinación de las dosis óptimas

La concentración de coagulante y la velocidad de agitación para la prueba de jarras se basó en la norma estadounidense ASTM D2035-13: Para el coagulante, se disolvió 1 g de  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  (Pureza mínima del 98%, marca CIVEQ) en 1 L de agua destilada para una concentración al 1%. La velocidad de agitación para la coagulación fue de 120 rpm por 1 min, para la floculación 30 rpm por 30 min y 15 min de sedimentación. Por su parte, para el floculante, la norma establece que se utilice una concentración de 0.5%. Para comprobar la efectividad del floculante como ayudante coagulación, se utilizó la mitad de la dosis óptima de coagulante en todas las jarras y considerando dosis de 0.2 y 0.5 mg/L de floculante. Al finalizar ambas pruebas se midieron los parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica, turbiedad, color y sólidos disueltos.

### d) Distribución del tamaño de flóculos

La técnica consistió en el procesamiento de imágenes de los flóculos formados con y sin floculante, con la intención de comparar el tamaño de los flóculos existentes en ambas. Se tomaron fotografías en ráfaga desde la floculación y se utilizó un área representativa de las obtenidas a los 5, 10 y 15 minutos para procesarse en el programa *ImageJ*. El resultado fue una base de datos que enlista el número de partícula con su área correspondiente.

### e) Dinámica de fluidos computacional

Para el análisis CFD se empleó el software ANSYS. *DesignModeler* es la herramienta que permite dibujar la geometría tridimensional de la jarra de acuerdo con sus dimensiones y características. Por su parte, la herramienta *Mesh* permitió generar una malla numérica sobre el dominio de solución. Esta malla tuvo un total de 683,811 nodos y 473,794 elementos. Finalmente, en *Fluent* se seleccionan los submodelos y las condiciones iniciales, estas últimas indispensables en simulaciones en estado transitorio. Los submodelos matemáticos empleados en el modelo matemático de CFD fueron: *i)* de fases: Multifásico euleriano con dos fases: agua y suelo, *ii)* turbulento: Viscoso  $k-\epsilon$  *realizable*. *iii)* modelo de balance de población discreto: simula los fenómenos aglomeración y rompimiento de las partículas.

## Resultados

Los resultados determinaron que la dosis óptima fue de 24 mg/L, obteniendo una eficiencia de remoción de turbiedad del  $93.1 \pm 0.6\%$  y de color del  $94.7 \pm 0.5\%$ . Las distintas concentraciones de floculante no presentaron diferencias significativas en la eficiencia de remoción, de acuerdo con un análisis de varianza empleando el método de Holm-Sidak para comparaciones múltiples, obteniéndose las eficiencias de  $93.7 \pm 0.9$  y  $94.03 \pm 0.3\%$  para 0.2 y 0.5 mg/L, respectivamente. Los resultados de la caracterización de las muestras en las pruebas con las dosis óptimas se presentan en Tabla 1.

**Tabla 1.**

Caracterización de agua tratada con dosis óptima de coagulante (24 mg/L) y floculante (0.5 mg/L)

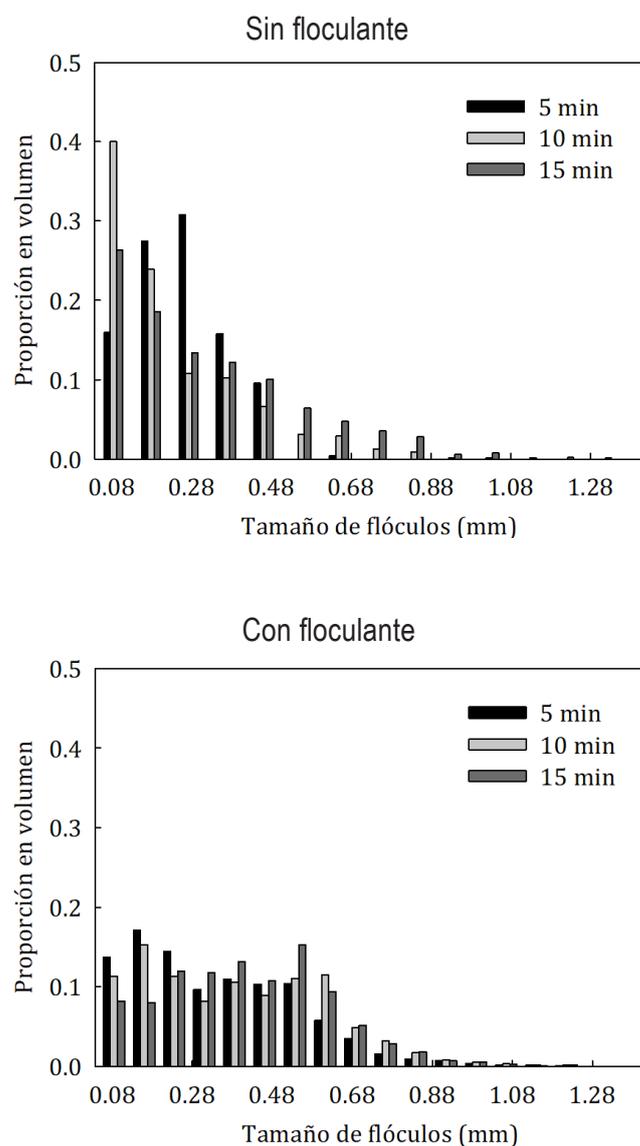
	pH	T (°C)	CE (µS)	SDT (ppm)	Turbiedad (FAU)	Color (Pt-Co)
C	6.6	29.3	273.8	136.2	14	76.1
	±0.05	±0.5	±2.4	±1.19	±1.10	±5.78
C + F	7	27.7	253.6	127	12	89.3
	±0.01	±0.1	±0.58	±1.12	±3	±17.93

C = coagulante, F = floculante.

La distribución del tamaño de los flóculos con y sin floculante se observa en la Figura 1. La prueba con floculante alberga una mayor proporción de flóculos con un tamaño más grande que en la prueba sin floculante.

**Figura 1.**

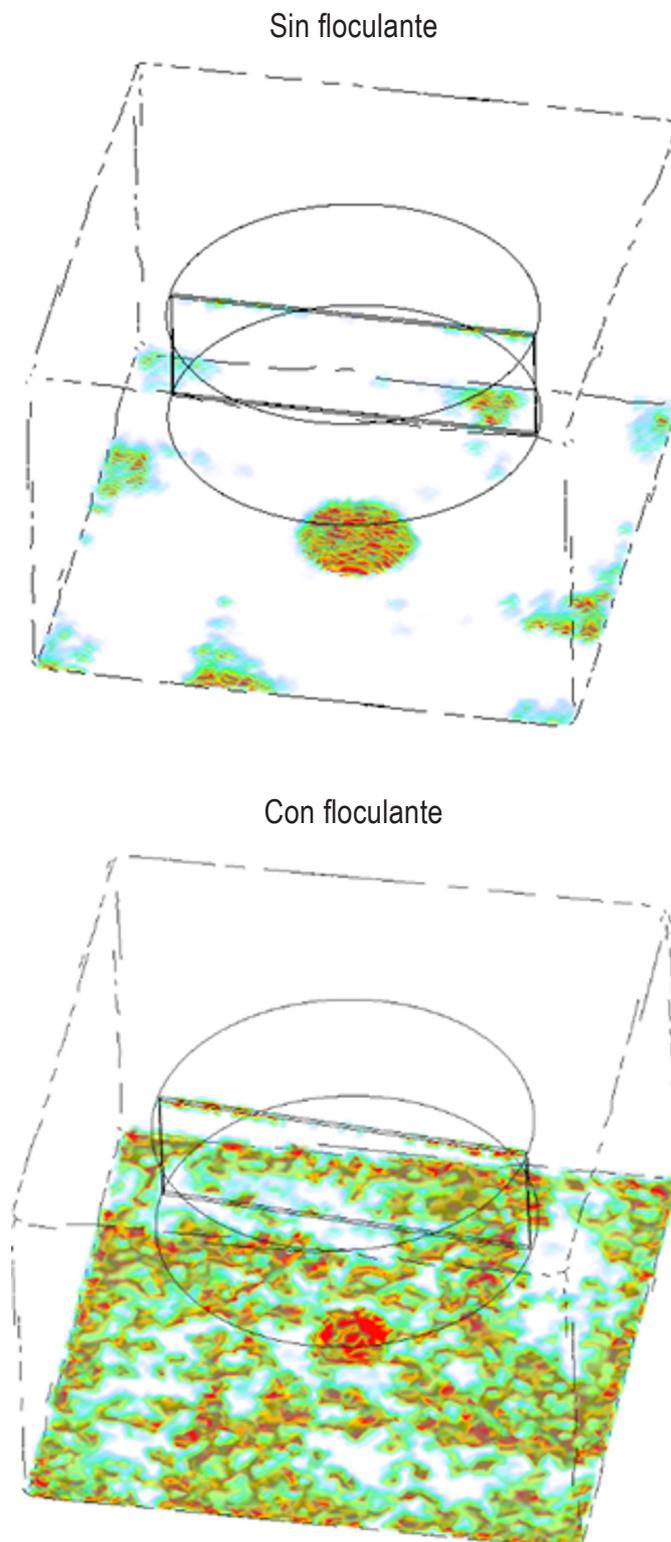
Distribución de tamaño de partícula experimental (Prueba de jarras y análisis de imagen) sin y con agente floculante (almidón)



En la Figura 2 se muestra la evolución de la simulación de las partículas en las pruebas con y sin floculante a los 60 s, el Modelo de Balance de Población precisó que las partículas con el tamaño más pequeño sobresalieran al inicio de la simulación, conforme su avance, las partículas incrementaron su tamaño, predominando el fenómeno de aglomeración y no el rompimiento, permitiendo aumentar su tamaño y sedimentar.

**Figura 2.**

Comparación del comportamiento de los flóculos en las pruebas con y sin floculante a los 60 s de simulación



## Discusión

En las pruebas de floculación se obtuvo un rango de pH de 6.4 a 7.1, al tratarse de una sal ácida, el efecto del sulfato de aluminio sobre el pH del agua consiste en una acidificación que incrementa con la dosificación, en las pruebas con floculante este efecto no ocurrió, siendo el almidón una sustancia capaz de neutralizar el pH de la muestra. El efecto del pH y la dosis óptima de coagulante coinciden con los presentados por Al-Sameraiy, (2012), León-Luque *et al.* (2016), Martínez-Morris *et al.* (2017) y Valeriano-Mamani y Matos-Chamorro (2019), quienes obtuvieron porcentajes de remoción de 93.3 a 99.7%. En el caso del pH, Valeriano-Mamani y Matos-Chamorro (2019) presentaron acidificación en el tratamiento con sulfato de aluminio, obteniendo un pH de hasta 5.9.

Las pruebas con floculantes obtuvieron porcentajes de remoción más eficientes que los obtenidos sin floculante considerando que es la mitad de la dosis de coagulante, demostrando el potencial del almidón en este proceso. Los porcentajes obtenidos coinciden con los de autores como Celaya López (2013), Mosleh *et al.* (2014), Olan Villatoro (2014), Ttito Surco (2018), Abd Rahim *et al.* (2019) y Chávez Melgarejo *et al.* (2019), que utilizaron sulfato de aluminio y almidón de distintas especies obteniendo porcentajes de remoción de 75.3 a 98.5%.

El análisis de imagen permitió determinar la distribución del tamaño de las partículas con un tamaño mínimo de 0.037 mm y máximo de 1.922 mm (de ambas pruebas), cabe destacar que el tamaño mínimo medido es afectado por la calidad de la imagen. En este estudio, el tamaño de flóculo mínimo detectado es mucho mayor al tamaño típico de los coloides de  $10^{-6}$  mm según Bratby (2016), lo que evidencia el límite de detección de la cámara fotográfica empleada para la adquisición de imágenes.

Los resultados obtenidos en la simulación CFD coinciden con la distribución de partículas de ambas pruebas, presentándose partículas más grandes desde el inicio en la prueba con floculante, así como mayor cantidad de sedimento por los flóculos con mayor diámetro.

## Conclusiones

Las conclusiones de este estudio son:

1. La malanga (*Colocasia esculenta*) tuvo un excelente desempeño como floculante y su alto contenido de almidón permitió obtener un rendimiento aceptable.
2. El análisis de imagen permitió observar el crecimiento de las partículas, demostrando que, con almidón como floculante, la proporción de partículas más grandes incrementa.
3. La simulación CFD resultó capaz de representar las características hidrodinámicas típicas de mezcladores rotacionales de flujo radial. Los valores de velocidad rotacional y gradiente de velocidad calculados con el análisis CFD fueron validados con los cálculos teóricos basados en el diámetro de la paleta.

## Referencias

- Abd Rahim, N.S., Othman, N., Nur Fahirah, S., Asharuddin, S.M. y Abdul Malek, M. (2019). Turbidity, COD and total suspended solid removal: application of nature coagulant cassava peel starch. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 8(4), 2277- 3878.
- Al-Sameraiy, M. (2012). A novel water pretreatment approach for turbidity removal using date sees and pollen sheath. *Journal of Water Resource and Protection*, 4, 79-92.
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. IWA Publishing.

- Celaya-López, O.A. (2013). *Evaluación De Almidones de Malanga (Colocasia esculenta) como Coadyuvantes en la Remoción de Turbiedad y Color durante el Proceso de Coagulación-Floculación en el Tratamiento de Aguas* [Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco].
- Chávez-Melgarejo, J.E., Cunaique-Huancas, I.J. y Pinco-Mendo, J.E. (2019). *Proceso de obtención y evaluación de la eficiencia del almidón del plátano de seda (Musa acuminata AAA) para la coagulación-floculación de las aguas superficiales del río Puchca – Ancash a nivel de laboratorio* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Callao].
- Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Hand, D.W., Howe, K.J. y Tchobanoglous, G. (2012). *Water treatment principles and design*. John Wiley & Sons, Inc.
- He, W., Zhao, Z., Nan, J., Xie, Z. y Lu, W. (2018). The role of mixing hydrodynamics on floc growth in unbaffled square stirred-tank reactors for flocculation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6,3041-3053.
- León-Luque, A.J., Barajas, C.L. y Peña-Guzmán, C.A. (2016). Determination of the Optimal Dose of Aluminum Sulfate in the Coagulation-Flocculation Process Using an Artificial Neural Network. *International Journal of Environmental Science and Development* 7(5), 346-350.
- Martínez Ortiz L. (2007). *Obtención y caracterización de almidones de malanga, arroz y maíz ceroso modificados por extrusión termoplástica para su uso como encapsulantes de aceite esencial de naranja* [Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana].
- Martínez-Morris, U.T., Marquina-Gelvez, C.E., Carrasquero-Ferrer, S., Martínez-Soto, M.E., Rodríguez-Monroy, C. y Morris-Díaz, A.T. (2017). *El Extracto de Semillas de Mango (Mangifera indica L) como Coagulante Natural en la Potabilización de Aguas*. 15th LAC-CEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education".
- Mosleh, L., Hashemi, S.H., Fard, R.D., Khoshbakht, K. y Shahbazi, A. (2014). Comparison of the performance of corn starch coagulant aid accompany with alum, polyaluminum chloride and ferric chloride coagulants in turbidity removal from water. *Journal of Environmental Health Engineering* 1(4), 248-258.
- Olán-Villatoro, M. (2014). *Evaluación de Almidones de Ñame (Dioscorea alata) como Agente Coadyuvante en la Remoción de Turbiedad y Color durante el Proceso de Coagulación-Floculación en la Potabilización de Agua* [Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco].
- Pengfei, R. y Jun, N. (2015). *CFD and experimental studies on the impact of impeller type on flow field and floc size evolution in a stirred tank*. International Conference on Advances in Energy and Environmental Science.
- Rodríguez Reyes, M.Y. (2006). *Obtención y caracterización de almidones modificados de malanga (Colocasia esculenta) y trigo (Triticum sativum), y su aplicación en la fabricación de yogurt* [Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana].
- Ttito Surco, R.M. (2018). *Evaluación de la eficacia del almidón de tres variedades de papa (Solanum tuberosum) como auxiliar del sulfato de aluminio en el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones altoandinas* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión].
- Valeriano-Mamani, J.J. y Matos-Chamorro, R.A. (2019). Influencia de la goma de tara (*Caesalpinia spinosa*) como ayudante en el proceso de coagulación-floculación para la remoción de turbidez de una suspensión artificial de bentonita. *Información Tecnológica* 30(5), 299-308.