

## Estudio de simulación de la eliminación de CR (VI) en aguas residuales



Revista EIA  
ISSN 1794-1237  
e-ISSN 2463-0950  
Año XIX/ Volumen 22/ Edición N.43  
Enero - junio 2025  
Reia4302 pp. 1-15

Publicación científica semestral  
Universidad EIA, Envigado, Colombia

### PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

González-Delgado, Á.; Villabona-Ortiz, Á.; Tejada-Tovar, C.; Vergara-Villadiego, J. C. y Olivella-Henao, E.  
Estudio de Simulación de la Eliminación de Cr (VI) en Aguas Residuales

Revista EIA, 22(43), Reia4302  
pp. 1-15.  
<https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1842>

✉ Autor de correspondencia:

Tejada-Tovar, C.  
M.Sc. Ingeniería Ambiental  
Correo electrónico:  
ctejadat@unicartagena.edu.co

**Recibido:** 30-10-2024  
**Aceptado:** 10-12-2024  
**Disponible online:** 01-01-2025

ÁNGEL GONZÁLEZ-DELGADO<sup>1</sup>

ÁNGEL VILLABONA-ORTIZ<sup>1</sup>

✉ CANDELARIA TEJADA-TOVAR<sup>1</sup>

JUAN C. VERGARA-VILLADIEGO<sup>1</sup>

ELKIN OLIVELLA-HENAO<sup>1</sup>

1. Universidad de Cartagena, Colombia

### Resumen

La adsorción es una técnica de superficie que es empleada para remover contaminantes como los metales pesados utilizando materiales orgánicos como bioadsorbentes. La mayoría de los estudios realizados de adsorción se han llevado a cabo a nivel de laboratorio por lo cual son muy pocos los estudios realizados que buscan predecir el comportamiento del proceso y la eficacia del adsorbente a nivel industrial. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es utilizar herramientas computacionales para modelar una columna de adsorción empacada a escala industrial para remover Cr (VI) en solución aprovechando la biomasa a base de *Theobroma cacao L* como material adsorbente. Para ello, se utilizó el software Aspen Adsorption para realizar varias simulaciones de una columna de adsorción a escala industrial con diferentes configuraciones para obtener una evaluación paramétrica empleando los modelos isotérmicos Langmuir y Freundlich con el modelo cinético de Resistencia Global Lineal (LDF). Los resultados obtenidos muestran que, el modelo Langmuir-LDF presentó eficiencias de adsorción de hasta 96% mientras que, el modelo Freundlich-LDF hasta el 97%. Por otro lado, las condiciones de simulación de la columna de adsorción que presentaron los mejores resultados para ambos casos fueron una altura de la columna de 4 m, concentración inicial de Cr (VI) de 2000 mg/L, y caudal de entrada de 100 m<sup>3</sup>/día. Este estudio se presenta como una forma novedosa en el campo de la ingeniería sobre como las herramientas computacionales posee la capacidad de predecir el posible comportamiento de columnas de adsorción empacadas con biomasa a base de residuos orgánicos.

**Palabras clave:** Adsorción, Biomateriales, Cromo (VI), Cinética, Curvas de ruptura, Evaluación, Isotermas, Parámetros, Simulación, Tratamiento de Aguas.

---

## Simulation study of CR (VI) removal from wastewater

### Abstract

Adsorption is a surface technique that is used to remove contaminants such as heavy metals using organic materials as bioadsorbents. Most of the adsorption studies have been carried out at the laboratory level, so there are very few studies that seek to predict the behavior of the process and the efficiency of the adsorbent at the industrial level. Therefore, the objective of the present study is to use computational tools to model an adsorption column packed at industrial scale to remove Cr (VI) in solution using *Theobroma cacao* L biomass as adsorbent material. For this purpose, Aspen Adsorption software was used to perform several simulations of an industrial scale adsorption column with different configurations to obtain a parametric evaluation using the Langmuir and Freundlich isothermal models with the Linear Global Resistance (LDF) kinetic model. The results obtained show that the Langmuir-LDF model presented adsorption efficiencies up to 96% while the Freundlich-LDF model up to 97%. On the other hand, the adsorption column simulation conditions that presented the best results for both cases were a column height of 4 m, initial Cr (VI) concentration of 2000 mg/L, and an inlet flow rate of 100 m<sup>3</sup>/day. This study is presented as a novel way in the engineering field on how computational tools have the ability to predict the possible behavior of adsorption columns packed with organic waste-based biomasses.

**Keywords:** Adsorption, Biomaterials, Chromium (VI), Evaluation, Isotherms, Kinetics, Parameters, Rupture curves, Simulation, Water treatment.

### 1. Introducción

En la actualidad, la contaminación de los cuerpos de agua son motivos de inquietud, debido a que daña tanto la salud como el bienestar de las personas y el ecosistema. Entre los contaminantes que presentes en el agua se pueden encontrar enfermedades microbiológicas, contaminantes químicos, pesticidas, medicamentos,

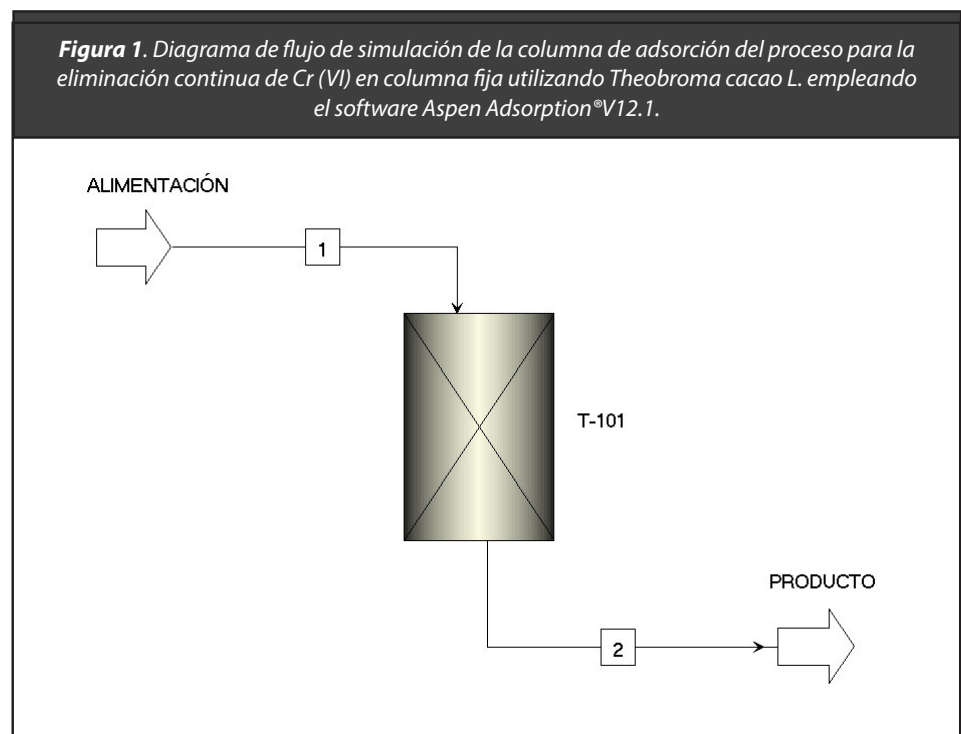
metales pesados, entre otros. Existen diferentes fuentes de estos contaminantes como productos químicos domésticos, escorrentías agrícolas y desechos industriales (Babuji *et al.*, 2023). La contaminación por metales pesados ha ido en aumento debido al incremento de la industrialización y la urbanización debido a la emisión y contaminación por parte de las operaciones antropogénicas como la minería, la fundición y el tratamiento de metales, el petróleo y el gas, las aguas residuales, entre otros (Nnaji *et al.*, 2023). El cromo es un metal pesado que, en su manifestación natural, puede presentarse en cromo trivalente en forma de óxidos e hidróxidos de cromo, o cromo hexavalente en forma de sales de cromato. El Cromo (VI) se caracteriza por ser venenoso, mutagénico, altamente soluble y cancerígeno, mientras que el Cromo (III) es un oligoelemento esencial para el bienestar humano (Selimin *et al.*, 2021). El cromo hexavalente es utilizado en varios ámbitos, principalmente en las industrias de curtidos, textiles, galvanoplastia, pigmentos, entre otras (Oliveira *et al.*, 2020). El límite permitido por la Organización Mundial de la Salud de Cr (VI) en el agua potable es de 0,05 mg/L (Gupta *et al.*, 2021). En Colombia el límite permitido para cromo en el agua potable dictaminado en la Ley 0631 de 2015 es de 0,5 mg/L (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

La adsorción es una técnica se ha empleado en diferentes estudios para el tratamiento de aguas residuales, debido a que es un proceso barato, sencillo, eficaz y amigable con el medio ambiente (Wang and Guo, 2020). Se empleado diferentes tipos de residuos naturales para la remoción de metales pesados. Entre estos, la cáscara de cacao, ha demostrado ser un adsorbente eficiente (Lara *et al.*, 2016; Tovar, Ortiz and Villadiego, 2017). Todos estos estudios se han desarrollado en su mayoría a nivel de laboratorio, por lo cual, se han empleado herramientas de ingeniería asistida por computador como Aspen Plus (Marcantonio *et al.*, 2020) o ChemCAD (Sánchez, Sánchez and Silva, 2019), con el fin de predecir el comportamiento y rendimiento del proceso de adsorción a escala industrial, sin embargo, la parametrización de columnas empacadas todavía se encuentra en fase temprana. Por lo tanto, este estudio busca modelar una columna empacada a nivel industrial empleando herramienta computacional y evaluación paramétrica para remover Cr (VI) en

solución utilizando residuos de caracas de cacao como adsorbente, con base en información experimental obtenida previamente por los autores (Lara *et al.*, 2016; Tovar, Ortiz and Villadiego, 2017; Tejada-Tovar, Villabona-Ortíz and González-Delgado, 2022). Demostrando el potencial de las herramientas computacionales para la predicción del rendimiento de una columna de adsorción y contribuyendo con información cuantitativa respecto al escalado y parametrización de una columna a nivel industrial empacada con *Theobroma Cacao L.*

## 2. Metodología

El sistema del presente estudio es una corriente contaminada con Cr (VI) que fluye a través de una columna de adsorción empacada con *Theobroma cacao L.* el cual se simuló empleando el software Aspen Adsorption<sup>®</sup>V12.1. En la Figura 1, se puede observar el diagrama de flujo de simulación de la columna de adsorción del proceso para la eliminación continua de Cr (VI) en columna fija utilizando *Theobroma cacao L.*



### **2.1. Propiedades físicas, parámetros y modelos matemáticos requeridos por Aspen Adsorption**

Para poder comenzar el proceso de simulación de la columna empacada primeramente se deben ingresar la lista de componentes y el paquete de propiedades físicas a emplear para remover el contaminante seleccionado, por lo cual se emplea la base de datos del software denominado Aspen Properties®. Se estableció como método de propiedades de Electrolito no aleatorio en dos líquidos (ELECNTL) debido a que trabajar con soluciones acuosas electrolíticas líquidas con concentraciones bajas y altas, mientras no se encuentre alguna fase vapor en la mezcla (Agarwal *et al.*, 2022). Luego de establecer los componentes y las propiedades físicas, es necesario configurar la columna empacada para efectuar el proceso adsorción por lo cual son necesarios diferentes parámetros requeridos por el software, para esto se tomaron como base diferentes estudios similares de procesos de adsorción empleando columnas empacadas a nivel industrial para la remoción de metales pesado. Para la configuración de la columna son requeridos los siguientes datos:

- Diámetro de la columna: 1 m (Agarwal *et al.*, 2022).
- Porosidad de la columna: 0,67 m<sup>3</sup> de vacío / m<sup>3</sup> de lecho (Dixon, 1988; Benyahia and O'Neill, 2005).
- Porosidad total de vacío: 0,4 (Dixon, 1988; Benyahia and O'Neill, 2005).
- Densidad de Bulk del adsorbente: 0,0365 g/cm<sup>3</sup> (Lara *et al.*, 2016).
- Coeficiente de transferencia de masa  $1,37 \times 10^{-4}$  (Koua, Koffi and Gbaha, 2019).

También, es necesario establecer que modelos matemáticos isotérmicos serán empleados para efectuar la simulación, debido a que, los valores asociados a las constantes de dichos modelos son requeridas para la configuración de la columna, Por lo tanto, para este estudio se establecieron los modelos isotérmicos de Langmuir

y Freundlich. Entonces, para el modelo isotérmico de Langmuir, quien presenta la adsorción procesos que se genera en una superficie monocapa (Sultana *et al.*, 2022), es descrito por la siguiente ecuación en literatura:

$$q_e = \frac{q_{max}bC_e}{1 + bC_e} \quad \text{Ec.2}$$

Buscando en el software la ecuación de Langmuir, esta se expresa de la siguiente manera:

$$w_i = \frac{IP_{1i} * IP_{2i} * c_i}{1 + IP_{2i} * c_i} \quad \text{Ec.3}$$

Donde, realizado una comparación entre las ecuaciones se determinó que  $q_{max} = IP_{1i}$ , es decir, la cantidad máxima de soluto en la fase sólida (mg/g);  $b = IP_{2i}$ , es decir es la constante de Langmuir que expresa la afinidad de los sitios activos con el contaminante (L/mg) y  $C_e = c_i$ , es decir, es la concentración de equilibrio del contaminante presente en la solución.

De igual manera, para el modelo isotérmico de Freundlich, que establece el proceso de adsorción como una adsorción de multicapa en una superficie heterogénea (Fouad, 2023). Se busco su homólogo en el software y se comparó con su versión en literatura. Por lo tanto, en literatura se describe con la siguiente ecuación:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \text{Ec.4}$$

Y en el software de la siguiente manera:

$$w_i = IP_{1i} c_i^{IP_{2i}} \quad \text{Ec.5}$$

Donde, realizado una comparación entre las ecuaciones se determinó que  $K_F = IP_{1i}$ , es decir, es la constante de Freundlich que indica la capacidad de adsorción  $\text{mg/g (mg/L)}^{1/n}$ ,  $K_F = IP_{1i}$  es decir, es el efecto de la concentración inicial en la capacidad de adsorción y  $C_e = c_i$ , es decir, es la concentración de equilibrio del contaminante presente en la solución. Teniendo claro los términos de las ecuaciones isotérmicas establecidas para la configuración de la columna de adsorción se emplearon los siguientes parámetros:

Parámetros de Langmuir:

- $q_{\max}$  (IP1): 227,348 mg/g (Tovar, Ortiz and Villadiego, 2017).
- $b$  (IP2): 0,0112 L/mg (Tovar, Ortiz and Villadiego, 2017).

Parámetros de Freundlich:

- $K_F$  (IP1): 8,6932  $\text{mg/g (mg/L)}^{1/n}$  (González-Delgado, Tejada-Tovar and Villabona-Ortíz, 2022)
- $1/n$  (IP2): 1,53 (González-Delgado, Tejada-Tovar and Villabona-Ortíz, 2022)

También es necesario establecer el modelo cinético a emplear para describir la velocidad del proceso de adsorción. Para este estudio, se estableció como modelo cinético el modelo de Resistencia Lineal Global (LDF) empleado por el software describe la velocidad de la adsorción empleando el coeficiente de transferencia de masa global, asume que la transferencia de masa de los componentes es impulsada por una expresión lineal expresada en términos de la concentración, ya sea en estado líquido o sólido (Durán, Rubiera and Pevida, 2022). Este modelo se describe mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial w_k}{\partial t} = MTC_{sk}(w_k^* - w_k) \quad \text{Ec.6}$$

Donde MTC es el coeficiente global de transferencia de masa (m/s) y  $w_k$  es la carga instantánea de equilibrio del adsorbato en el adsorbente (mg\*g).

## **2.2. Evaluación paramétrica**

Para evaluar el efecto de la alteración de parámetros en el proceso de adsorción se realizó una evaluación paramétrica llevando a cabo tres situaciones para el desarrollo del proceso: alteración de la altura de la columna, alteración del caudal de entrada y alteración de la concentración inicial. Por lo cual, la simulación para comprobar el impacto generado por el cambio de la altura sobre los tiempos y el rendimiento del proceso, se llevó a cabo empleando un rango de variación de 3 y 4 m dejando fija la concentración inicial y el caudal de entrada. De igual manera, se evaluó el caudal de entrada manteniendo fijos los parámetros de la altura y la concentración inicial, empleando magnitudes de 100 y 200 m<sup>3</sup>/día (Upadhyay *et al.*, 2021). Finalmente, se analizó el efecto de la alteración de la concentración inicial empleando valores de concentración de 1000 y 2000 mg/L, dejando fija la altura y el caudal de entrada (Gupta *et al.*, 2021).

## **3. Resultado y discusiones**

### **3.1. Evaluación impacto de la variación de los parámetros en el proceso de adsorción**

Empleando la herramienta de ingeniería de asistencia por computación Aspen Adsorption se efectuó el modelado y simulación de una columna empacada con residuos de Theobrama Cacao L. utilizando diferentes configuraciones paramétricas de la altura de la columna, concentración inicial y caudal de entrada usando los modelos isotérmicos Langmuir y Freundlich en combinación con el modelo cinético LDF. Los resultados obtenidos del tiempo de Ruptura (T.R) y Tiempo de saturación (T.S) de las simulaciones se presentan en la Tabla 1 para el modelo Langmuir-LDF y en la Tabla 2 para el modelo Freundlich-LDF.



**Tabla 1. Resultados de la implementación del modelo Langmuir con LDF.**

Langmuir -LDF		Caudal (m <sup>3</sup> /día)			
		200		100	
		Altura (m)			
Concentración (mg/L)	Resultados	3	4	3	4
2000	T.R (min)	157	214	327	441
	T.S (min)	1341	1732	2481	3186
1000	T.R (min)	179	242	370	498
	T.S (min)	1253	1619	2299	2942

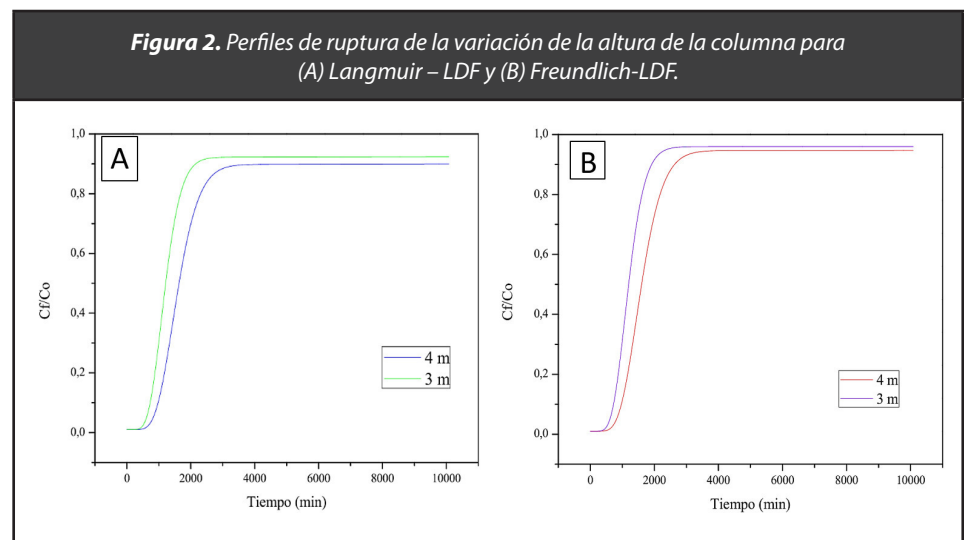
**Tabla 2. Resultados de la implementación del modelo Freundlich con LDF.**

Freundlich -LDF		Caudal (m <sup>3</sup> /día)			
		200		100	
		Altura (m)			
Concentración (mg/L)	Resultados	3	4	3	4
2000	T.R (min)	157	214	327	441
	T.S (min)	1341	1732	2480	3201
1000	T.R (min)	179	242	370	498
	T.S (min)	1254	1620	2307	2950

### 3.1.1. Efecto de la altura de la columna

Se evaluó el impacto generado por el cambio de la altura de la columna en un rango de 3 y 4 metros con una concentración inicial de 2000 mg/L y un caudal de entrada de 100 m<sup>3</sup>/día. Se evidenció que, al reducir la altura de la columna se presentaba un efecto positivo en la eficiencia del proceso de adsorción, sin embargo, los tiempos de ruptura y saturación presentaban una disminución. Este comportamiento se presentó para ambos casos de estudio, es decir, tanto para Langmuir (Figura 2.A) como para Freundlich. (Figura 2.B). Esto sucede debido a que, con una columna más pequeña, el fluido necesitara menos tiempo para que atravesar el equipo obteniendo una reducción en el tiempo de residencia. Las eficiencias del proceso de adsorción para Langmuir-LDF fueron 92,5% para 3 metros y

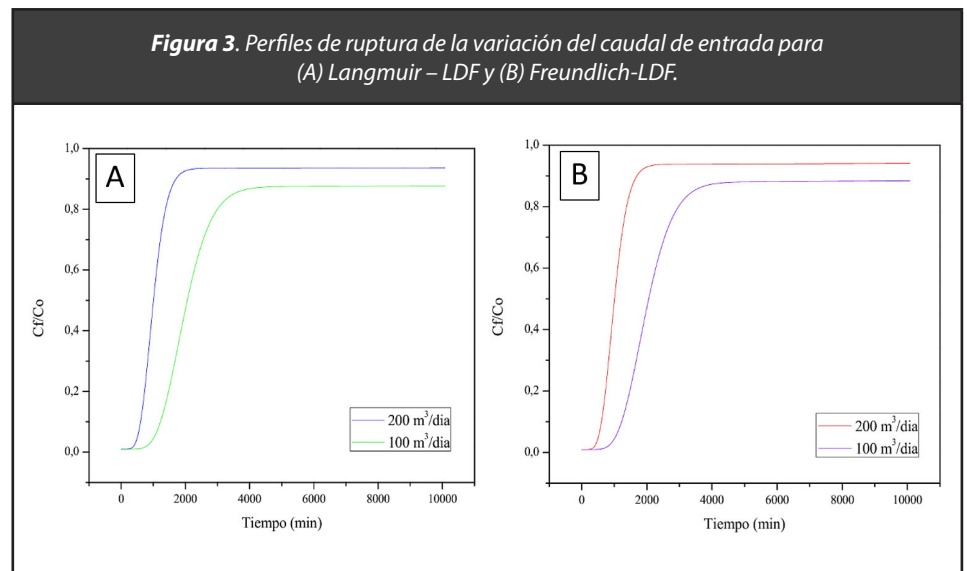
90,1% para 4 metros. Por otro lado, Freundlich obtuvo eficiencia de 93,1% para 3 metros y 91% para 4 metros (Mansa, Ting and Patrick, 2021; González-Delgado, Tejada-Tovar and Villabona-Ortíz, 2022). Se puede observar que los resultados obtenidos son similares donde el modelo de Freundlich-LDF presento una ligera diferencia en la eficiencia del proceso dando a entender que, la adsorción se efectúa en una superficie homogénea de múltiples capas.



### 3.2.2. Efecto del caudal de entrada

Se evaluó el impacto generado por el cambio del caudal de entrada empleado magnitudes de 200 y 100 m<sup>3</sup>/día con una altura de 4 m y una concentración inicial de 2000 mg/L, observando una reducción en los tiempos de ruptura y saturación, pero se veía beneficiado de manera positiva la eficiencia del proceso de adsorción a medida que incrementaba el caudal. Este comportamiento se presentó para ambos casos de estudio, es decir, tanto para Langmuir (Figura 3.A) como para Freundlich. (Figura 3.B). Esto es debido a que, se genera un efecto positivo en la transferencia de masa y la resistencia a la misma, ya que hay un mayor ingreso de efluente por unidad de tiempo, provocando una reducción en los tiempos pro un aumento en la eficiencia del proceso de adsorción. Las eficiencias del proceso de adsorción para Langmuir-LDF fueron 94,9% para 200 m<sup>3</sup>/día y 90,1% para 100 m<sup>3</sup>/día mientras que, Freundlich obtuvo eficiencia de 95,3% para 200 m<sup>3</sup>/día y 91% para 100 m<sup>3</sup>/día

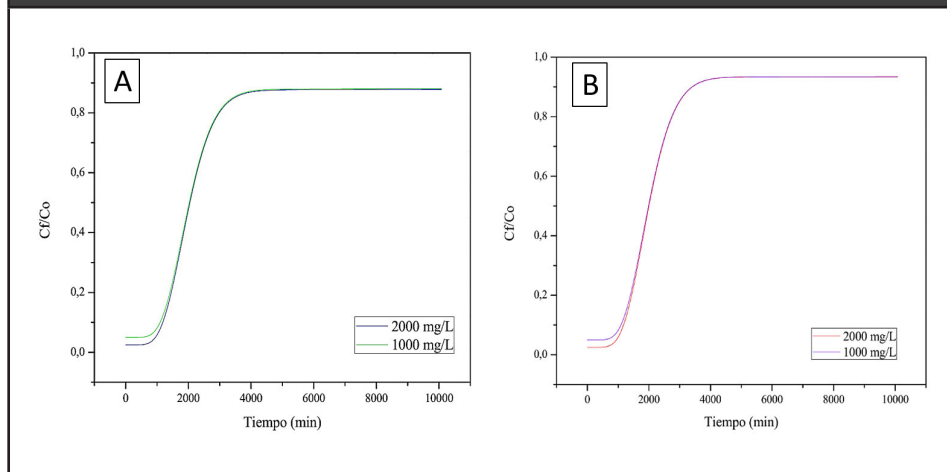
(Nieva, Andres and Gonzales, 2018). Se evidencia que, los resultados obtenidos son similares, siendo el modelo de Freundlich-LDF quien mejor presenta resultados del proceso de adsorción en comparación al modelo Langmuir reforzando que la adsorción se produce en una superficie homogénea de múltiples capas.



### 2.2.3. Efecto de la concentración inicial del contaminante

Se analizó la variación del parámetro de la concentración inicial con valores de 2000 y 1000 mg/L con una altura de 4 m y un caudal de entrada de 100 m<sup>3</sup>/día, observando que al ir disminuyendo o aumentando la concentración inicial tanto la eficiencia del proceso como los tiempos de ruptura y saturación no se veía afectados significativamente para ambos modelos empleados (Figura 4.A y Figura 4.B). Este puede deberse a que la cantidad de sitios activos presentes en el adsorbente o que la afinidad que posee el adsorbente con el adsorbato permitió alcanzar un rápido equilibrio de adsorción (Patel, 2020).

Figura 4. Perfiles de ruptura de la variación de la concentración inicial para (A) Langmuir – LDF y (B) Freundlich-LDF.



Estos hallazgos permitieron evidencia el impacto que generan la variación de estos parámetros, siendo el caudal de entrada el parámetro que más afecta al proceso, seguida de la altura de la columna empacada y finalmente la concentración inicial que, como se presentó anteriormente, es el parámetro que menos perturba a la adsorción de Cr (VI). Además, los modelos isotérmicos Langmuir y Freundlich con el modelo cinético LDF presentaron excelentes resultados en comparación a los reportados en la literatura para realizar las simulaciones de la columna empacada para diferentes metales pesados y biomosas empleadas (Bahrún *et al.*, 2021; Upadhyay *et al.*, 2021).

#### 4. Conclusiones

A través del software Aspen Adsorption, esta investigación demostró como se puede anticipar el comportamiento y rendimiento del *Theobroma Cacao L* en un proceso a escala industrial, evidenciado el potencial de implementar herramientas informáticas. Se emplearon diferentes configuraciones de modelos matemáticos para las simulaciones de la columna, siendo estos arreglos Langmuir-LDF y Freundlich-LDF, donde se presentaron el efecto que poseía la

alteración de los parámetros de concentración inicial, caudal de entrada y altura de la columna sobre el tiempo de ruptura, tiempo de saturación y la eficiencia del proceso de adsorción empleando evaluación de sensibilidad paramétrica. Los resultados obtenidos evidenciaron que, Freundlich fue el mejor modelo que se ajustó al proceso permitiendo demostrar que, el proceso de adsorción se generó en una superficie de múltiples capas de carácter heterogéneo. Por otro lado, empleando una evaluación paramétrica se analizó el impacto generado la alteración de la altura del lecho, el caudal de entrada y la concentración inicial en la eficiencia del proceso, tiempo de ruptura, tiempo de saturación. Se trabajó el parámetro de la altura del lecho en magnitudes de 3 metros y 4 metros, donde al trabajar con el valor más alto se presentaba un aumento en el T.R y el T.S, pero la eficiencia obtenida disminuye. Se usó un rango de caudal de entrada de 100 y 200 m<sup>3</sup>/día, donde utilizando el caudal más elevado se presentan disminuciones en los tiempos de ruptura y saturación, pero un incremento en el rendimiento de la adsorción. Además, se utilizaron concentraciones iniciales de 2000 y 1000 mg/L, donde al cambiar la concentración, la eficiencia de adsorción no se ve influenciada notablemente. Finalmente, se evidenció que, el modelo Langmuir-LDF presentó eficiencias de adsorción de hasta el 96%, mientras que para el modelo Freundlich-LDF se obtuvieron eficiencias de hasta el 97%.

## Referencias

- Agarwal, A., Upadhyay, U., Sreedhar, I. and Anitha, K.L. (2022) 'Simulation studies of Cu (II) removal from aqueous solution using olive stone', *Cleaner Materials*, 5, p. 100128. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100128>.
- Babuji, P., Thirumalaisamy, S., Duraisamy, K. and Periyasamy, G. (2023) 'Human Health Risks due to Exposure to Water Pollution: A Review', *Water* 2023, Vol. 15, Page 2532, 15(14), p. 2532. Available at: <https://doi.org/10.3390/W15142532>.
- Bahrún, M.H.V., Kamin, Z., Anisuzzaman, S.M. and Bono, A. (2021) 'Assessment of adsorbent for removing lead (pb) ion in an industrial-scaled packed bed column', *Journal of Engineering Science and Technology*, 16(2), pp. 1213–1231.
- Benyahia, F. and O'Neill, K.E. (2005) 'Enhanced voidage correlations for packed beds of various particle shapes and sizes', *Particulate Science and Technology*, 23(2), pp. 169–177. Available at: <https://doi.org/10.1080/02726350590922242>.

- Dixon, A.G. (1988) 'Correlations for wall and particle shape effects on fixed bed bulk voidage', *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 66(5), pp. 705–708. Available at: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450660501>.
- Durán, I., Rubiera, F. and Pevida, C. (2022) 'Modeling a biogas upgrading PSA unit with a sustainable activated carbon derived from pine sawdust. Sensitivity analysis on the adsorption of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> mixtures', *Chemical Engineering Journal*, 428. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132564>.
- Fouad, M.R. (2023) 'Physical characteristics and Freundlich model of adsorption and desorption isotherm for fipronil in six types of Egyptian soil', *Current Chemistry Letters*, 12(1), pp. 207–216. Available at: <https://doi.org/10.5267/j.ccl.2022.8.003>.
- González-Delgado, Á.D., Tejada-Tovar, C. and Villabona-Ortiz, A. (2022) 'Parametric Sensitivity Analysis of Chromium (VI) Adsorption using Theobroma Cacao L Biomass via Process Simulation', *Chemical Engineering Transactions*, 92(January), pp. 535–540. Available at: <https://doi.org/10.3303/CET2292090>.
- Gupta, B., Mishra, A., Singh, R. and Thakur, I.S. (2021) 'Fabrication of calcite based biocomposites for catalytic removal of heavy metals from electroplating industrial effluent', *Environmental Technology and Innovation*, 21, p. 101278. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101278>.
- Koua, B.K., Koffi, P.M.E. and Gbaha, P. (2019) 'Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans', *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(1), pp. 72–82. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.01.002>.
- Lara, J., Tejada, C., Villabona, A., Arrieta, A. and Granados-Conde, C. (2016) 'Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao', *Revista ION*, 29(2), pp. 113–124. Available at: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016009>.
- Mansa, R.F., Ting, M.L. and Patrick, A.O. (2021) 'Simulation of Lead Removal Using Palm Kernel Shell Activated Carbon in a Packed Bed Column'.
- Marcantonio, V., Bocci, E., Ouweltjes, J.P., Del Zotto, L. and Monarca, D. (2020) 'Evaluation of sorbents for high temperature removal of tars, hydrogen sulphide, hydrogen chloride and ammonia from biomass-derived syngas by using Aspen Plus', *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), pp. 6651–6662. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.142>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015) 'Resolucion 631 de 2015 vertimientos minambiente.pdf', p. 62.
- Nieva, A.D., Andres, J.C.S. and Gonzales, K.P. (2018) 'Simulated biosorption of Cu<sup>2+</sup> in aqueous solutions using Cucumis melo VAR. cantalupensis', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 191(1). Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/191/1/012035>.

- Nnaji, N.D. Onyeaka, H., Miri, T. and Ugwa, C. (2023) 'Bioaccumulation for heavy metal removal: a review', *SN Applied Sciences*, 5(5), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1007/S42452-023-05351-6/METRICS>.
- Oliveira, R.F., Pacheco-Nunes, K.G., Jurado, I.V., Benício-Amador, I.C., Estumano, D.C. and Féris, L.A. (2020) 'Cr (VI) adsorption in batch and continuous scale: A mathematical and experimental approach for operational parameters prediction', *Environmental Technology and Innovation*, 20, p. 101092. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101092>.
- Patel, H. (2020) 'Batch and continuous fixed bed adsorption of heavy metals removal using activated charcoal from neem (*Azadirachta indica*) leaf powder', *Scientific Reports*, 10(1), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72583-6>.
- Sánchez, A.P., Sánchez, E.J.P. and Silva, R.M.S. (2019) 'Simulation of the acrylic acid production process through catalytic oxidation of gaseous propylene using ChemCAD® simulator', *Ingeniare*, 27(1), pp. 142–150. Available at: <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000100142>.
- Selimin, M.A., Latif, A., Er, Y., Muhamad, M., Basri, H. and Lee, T. (2021) 'Adsorption efficiency of banana blossom peels (*musa acuminata* colla) adsorbent for chromium (VI) removal', *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.10.502>.
- Sultana, S., Islam, K., Hasan, M.A., Khan, H.M.J., Khan, M.A.R., Deb, A., Al Raihan, M. and Rahman, M. (2022) 'Adsorption of crystal violet dye by coconut husk powder: Isotherm, kinetics and thermodynamics perspectives', *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 17(May 2021), p. 100651. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100651>.
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, A. and González-Delgado, A. (2022) 'Adsorption Study of Continuous Heavy Metal Ions (Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>) Removal Using Cocoa (*Theobroma cacao* L.) Pod Husks', *Materials*, 15(19). Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15196937>.
- Tovar, C.T., Ortiz, Á.V. and Villadiego, M.J. (2017) 'Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente.', *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 20(1), pp. 139–147.
- Upadhyay, U. Gupta, S., Agarwal, A., Sreedhar, I and Anitha, K. (2021) 'Process Optimization at an Industrial Scale in the adsorptive removal of Cd<sup>2+</sup> ions using Dolochar via Response Surface Methodology', *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 0–27. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17216-9>.
- Wang, J. and Guo, X. (2020) 'Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method', *Chemosphere*, 258, p. 127279. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>.