



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 21/ Edición N.42
Julio - diciembre de 2024
Reia4226 pp. 1-18

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

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

González-Delgado, A.; Tejada-Tovar, C.;
Villabona-Ortiz, A.; Vergara-Villadiego,
J.; Olivella-Henao, E.

Modelado y parametrización de
una columna de adsorción para
la remoción de níquel utilizando
ingeniería de procesos asistida por
computador

Revista EIA, 21(42), Reia4226.
pp. 1-18.
<https://doi.org/10.24050/reia.v21i42.1778>

✉ *Autor de correspondencia:*

Candelaria Tejada-Tovar
M.Sc. Ingeniería Ambiental
Universidad de Cartagena, Colombia
ctejadat@unicartagena.edu.co

Recibido: 29-04-2024

Aceptado: 27-05-2024

Disponible online: 01-07-2024

Modelado y parametrización de una columna de adsorción para la remoción de níquel utilizando ingeniería de procesos asistida por computador

ÁNGEL GONZÁLEZ-DELGADO¹

✉ CANDELARIA TEJADA-TOVAR¹

ÁNGEL VILLABONA-ORTIZ¹

JUAN VERGARA-VILLADIEGO¹

ÉLKIN OLIVELLA-HENAO¹

1. Universidad de Cartagena, Colombia

Resumen

Los metales pesados son contaminantes que se generan por diferentes actividades siendo una de estas el vertimiento de aguas residuales por parte de las industrias en cuerpos de agua lo cual representa una gran amenaza para la biota acuática y terrestre, así como la salud. Estos contaminantes son persistentes, bioacumulables y no biodegradables, generando un efecto negativo en la cadena trófica de la zona de influencia. El níquel es un metal pesado que se emplea en diferentes tipos de industrias como las productoras de baterías. Este genera diferentes efectos nocivos en el cuerpo humano, como en el sistema cardiovascular o el digestivo cuando hay exposición en grandes cantidades. El objetivo del presente estudio es emplear la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (CAPE por sus siglas en inglés) para modelar una columna operativa a escala industrial tendiente a la adsorción Níquel (II) en solución acuosa aprovechando la biomasa de *Theobroma cacao L.* Por consiguiente, se empleó el software Aspen Adsorption para llevar a cabo múltiples simulaciones de una columna de adsorción utilizando diversas configuraciones a nivel industrial, con el objetivo de realizar un análisis de sensibilidad paramétrica. En los resultados obtenidos, se evidencia que el modelo Langmuir- modelo cinético de resistencia lineal global (LDF) utilizado para simular la columna de adsorción en la eliminación de Níquel (II) logra eficiencias de hasta un 95.8%. Las mejores condiciones para la simulación en la columna de adsorción fueron un caudal de entrada de

300 m³/día, una altura del lecho de 5 m y una concentración inicial de 2000 mg/L. Además, se observó que el aumento del caudal de entrada condujo a una disminución en el tiempo de ruptura y saturación del proceso, mientras que, aumentar la altura del lecho presenta un incremento en el tiempo de ruptura y saturación. Por otro lado, la concentración no afectó de manera significativa a la eficiencia del proceso.

Palabras clave: Biomateriales.; CAPE.; Cinética; Curva de ruptura.; Evaluación.; Níquel (II).; Isothermas.; Parámetros.; Simulación.; Tratamiento de Aguas.

Modeling and parametrization of an adsorption column for nickel removal using computer-aided process engineering

Abstract

Heavy metals are pollutants that are generated by different activities, one of which is the dumping of wastewater by industries into bodies of water, which represents a great threat to aquatic and terrestrial biota, as well as health. These contaminants are persistent, bioaccumulative and non-biodegradable, generating a negative effect on the food chain in the area of influence. Nickel is a heavy metal that is used in different types of industries such as battery production. This generates different harmful effects on the human body, such as the cardiovascular or digestive system when exposed in large quantities. The objective of the present study is to use Computer Aided Process Engineering (CAPE) to model an operational column on an industrial scale aimed at the adsorption of Nickel (II) in aqueous solution taking advantage of the biomass of *Theobroma cacao L.* Consequently, Aspen Adsorption software was used to carry out multiple simulations of an adsorption column using various industrial configurations, with the aim of performing a parametric sensitivity analysis. In the results obtained, it is evident that the Langmuir model - global linear resistance kinetic model (LDF) used to simulate the adsorption column in the elimination of Nickel (II) achieves efficiencies of up to 95.8%. The best conditions for the simulation in the adsorption column were an inlet flow rate of 300 m³/day, a bed height of 5 m and an initial concentration of 2000 mg/L. Furthermore, it was observed that increasing the inlet flow led to a decrease in the rupture and saturation time of the process, while increasing the bed height presented an increase in the rupture and saturation time. On the other hand, concentration did not significantly affect the efficiency of the process.

Keywords: Breakthrough curve.; Biomateriales.; CAPE.; Evaluation.; Isotherms.; Kinetics; Nickel (II).; Parameters.; Simulation.; Water Treatment.

1. Introducción

No es un secreto que el rápido crecimiento industrial conlleva innegablemente a la contaminación de los diferentes recursos naturales, entre estos los cuerpos de agua afectando así la calidad de los recursos hídricos. El tratamiento de aguas residuales ha sido una preocupación relevante en las últimas décadas ya que estas no solo afectan al medio ambiente sino también a la sociedad humana (Kumar & Kumar, 2022). Entre los múltiples contaminantes que se pueden encontrar en el agua, los metales pesados son los más detectados en comparación a los otros, generando una gran preocupación debido a que son tóxicos, no biodegradables y muy difíciles de eliminar. Estos provienen de diferentes fuentes como actividades agrícolas, las erupciones volcánicas y/o las actividades industriales, entre otros (Biswal & Balasubramanian, 2023; Senanu et al., 2023)

El níquel es uno de los elementos que más se encuentra en la tierra. Este representa el 3% de la composición total de la Tierra, el cual se genera de forma natural por diferentes actividades en el agua, aire o suelo (Mustafa et al., 2023) Algunas de sus fuentes naturales son erupciones volcánicas, meteorización de las rocas e incendios forestales, también la minería, la industria de baterías y el transporte ferroviario son responsables de la propagación de Ni en el ambiente (Kumar et al., 2023; Shourije et al., 2023). La exposición al Ni (II) genera diferentes efectos nocivos en la salud afectando a algunos sistemas como cardiovasculares y respiratorios. Según la Organización Mundial de la Salud, la cantidad máxima permitida en agua potable de Ni (II) es de 0,02 mg/L (World Health Organization WHO, 2023).

Para remover los metales pesado en cuerpos de agua se han empleado diferentes técnicas como la coagulación (Jmiais et al., 2023), proceso de intercambio iónico (Zhu et al., 2023), y la adsorción (Wang et al., 2023), siendo considerada esta última como una de las mejores opciones debido a su bajo coste, su fácil funcionamiento, la ausencia de costes operativos adicionales para la eliminación de lodos, su corta duración y su aplicabilidad a numerosas aplicaciones (Velarde et al., 2023). Empleando el método se han realizado diferentes estudios para la remoción de metales pesados utilizando residuos agroindustrial

(Tejada-Tovar et al., 2023) como pseudotallo de plátano (Tejada-Tovar et al., 2022), bagazo de palma de aceite, cáscaras de ñame (Villabona-Ortíz et al., 2022), cáscara de naranja (Tejada-Tovar et al., 2018), entre otros. Estudios donde se emplea el cacao, especialmente su cáscaras, ha permitido evidenciar que es un excelente sorbente natural para eliminar de iones de metales pesados (Lara et al., 2016; Tejada-Tovar et al., 2017).

También para remover contaminantes en cuerpos de agua se ha venido implementado diferentes software computacionales para realizar simulaciones de diferentes procesos y/o equipos para remover de manera exitosa la contaminación sin la necesidad de realizar experimentaciones en los laboratorio que pongan en riesgo la integridad de los investigadores (González-Delgado et al., 2022), algunos de estos software son Aspen Plus (Marcantonio et al., 2020) o ChemCAD (Tejada-Tovar et al., 2017), pero el modelado robusto de columnas de adsorción se encuentra en fase temprana. Por esto, se emplea el software Aspen Adsorption para modelar, parametrizar y evaluar diferentes modelos para este tipo de columnas en este estudio como un factor innovador. Debido a todo lo anterior, este estudio busca modelar una columna de adsorción operativa a escala industrial para la remoción Ni (II) en solución, utilizando biomasa de *Theobroma cacao L.* como adsorbente con base en información experimental obtenida previamente por los autores (Lara et al., 2016; Tejada-Tovar et al., 2022; Tejada-Tovar et al., 2017), combinando análisis de sensibilidad paramétrica y simulación utilizando ingeniería de procesos asistida por computador.

2. Metodología

2.1. Estudio paramétrico

Se realizaron estudios paramétricos para determinar el efecto que posee modificar diferentes parámetros en el proceso de lecho compacto sobre el rendimiento de la adsorción, evaluando el perfil de la curva de ruptura. Se evaluaron tres factores de análisis: caudal

de entrada, concentración inicial y altura del lecho. Los intervalos de operación evaluados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Estudios paramétricos sobre el efecto de tres parámetros, y el rango de valores empleada en este estudio.

Factores de análisis	Unidades	Rangos de variación					Fuente
		50	1000	2000	3000	5000	
Concentración inicial	mg/L	50	1000	2000	3000	5000	(Almazán-Ruiz et al., 2015; W. Guan et al., 2017)
Altura del lecho	m	4		5	6		(Juella et al., 2022; Upadhyay et al., 2021)
Caudal	m ³ /día	100	150	200	250	300	(Upadhyay et al., 2021)

2.2. Columna de lecho empacado a escala industrial

Para el escalado de la torre empacada de adsorción de iones de Ni (II), se tomaron como referente sistemas similares de columnas de adsorción de metales pesados en aguas residuales a escala industrial. Los parámetros de la columna empacada a escala industrial para este estudio se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de la columna de adsorción para la simulación

Parámetros	Valores	Fuentes
Diámetro del lecho, m	1	(Agarwal et al., 2022)
Porosidad del lecho, m ³ de vacío / m ³ de lecho	0,67	(Benyahia & O'Neill, 2005; Dixon, 1988)
Densidad de Bulk, g/cm ³	0,0365	(Lara et al., 2016)
Coefficiente de transferencia de masa,	1,37x10 ⁻⁴	(Koua et al., 2019)
Porosidad de lecho	0,6	(Benyahia & O'Neill, 2005; Dixon, 1988)
Porosidad por vacío total	0,4	(Benyahia & O'Neill, 2005; Dixon, 1988)

2.3. Modelos Matemáticos.

2.3.1. Modelos isotérmicos de adsorción

Las isotermas de adsorción describen la interacción entre el adsorbato y el adsorbente, desempeñando un papel crucial en la optimización del uso de cualquier adsorbente. Su comportamiento está influenciado por la naturaleza de la especie adsorbida (adsorbato), el tipo de adsorbente y varias propiedades físicas de la solución, tales como el pH, la fuerza iónica y la temperatura (Biswal & Balasubramanian, 2023).

2.3.1.1. Modelo isotérmico de Langmuir

La isoterma de Langmuir es un modelo empírico que expresa que el proceso de adsorción presenta sitios localizados idénticos y equivalentes con un espesor de una molécula de capa adsorbida. Este modelo describe la adsorción de fase gas-sólido de la siguiente manera: la adsorción ocurre en monocapa, la fuerza de adsorción es uniforme en la superficie del adsorbente homogéneo y finalmente no se presentan inconvenientes entre moléculas adsorbidas, incluso en sitios adyacentes (Chen et al., 2022; Punia et al., 2022). Este modelo se describe mediante la ecuación 1:

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

2.3.2. Modelos cinéticos

En el proceso de adsorción, la cinética es un factor importante que permite verificar la eficiencia de la sorción, ya que esta describe la velocidad con la que el adsorbente adsorbe al adsorbato y el tiempo de residencia que se presenta en la interfaz sólido-líquido, es decir, ofrece detalles sobre la rapidez de adsorción, la eficacia del adsorbente empleado, y los mecanismos de transferencia de masa. El modelo cinético permite concluir si una interacción única o una combinación de estas controla el proceso de adsorción, además de ofrecer datos

pertinentes sobre la aplicabilidad práctica del adsorbente (Musah et al., 2022; Vareda, 2023)

2.3.2.1. Modelo cinético LDF

El modelo cinético LDF es un mecanismo desarrollado para estudiar la difusión superficial con una difusividad constante. Este modelo describe la cinética del proceso utilizando un coeficiente de transferencia de masa global, asumiendo que la fuerza impulsora para la transferencia de masa de los componentes es una función lineal de la concentración del componente en fase líquida o fase sólida (Ahmed et al., 2020; Júnior & Pessoa Filho, 2023). Este modelo se encuentra en el software Aspen Adsorption y se describe mediante la ecuación 2:

$$\frac{\partial w_k}{\partial t} = MTC_{sk}(w_k^* - w_k) \quad \text{Ec. 2}$$

3. Resultado y discusiones

3.1. Evaluación de modelos matemáticos de cinética e isothermas de adsorción molecular, utilizando el software Aspen Adsorption

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos del Tiempo de ruptura (T.R) y Tiempo de saturación (T.S) de la evolución de los modelos matemáticos.

Tabla 3. Resultados evaluación modelo Langmuir-LDF.

Langmuir - LDF		Caudal (m3/día)														
		100			150			200			250			300		
		Altura del lecho (m)														
Concentración (mg/L)	Resultados	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
		5000	T.R (min)	584	734	1127	385	484	745	193	360	556	227	193	443	190
T.S (min)	4539		6035	8097	2980	3694	4797	2250	2695	3618	1759	2250	3068	1466	1891	2458
3000	T.R (min)	584	734	1127	385	484	745	193	360	556	227	193	443	190	161	323
	T.S (min)	4068	5105	6614	2772	3437	4485	2125	2592	3453	1705	2125	2753	1418	1757	2346
2000	T.R (min)	584	734	1127	385	484	745	193	360	556	227	193	442	190	161	323
	T.S (min)	3936	4838	6325	2702	3325	4371	2068	2503	3336	1650	2068	2696	1414	1707	2245
1000	T.R (min)	584	734	1127	385	484	745	193	360	556	228	193	442	190	161	322
	T.S (min)	3708	4515	5937	2533	3128	4072	1969	2383	3155	1595	1969	2570	1336	1644	2170
50	T.R (min)	642	801	1197	415	531	805	193	387	602	227	193	474	190	161	322
	T.S (min)	3322	4133	5633	2229	2781	3796	1937	2049	2840	1569	1905	2276	1331	1623	2127

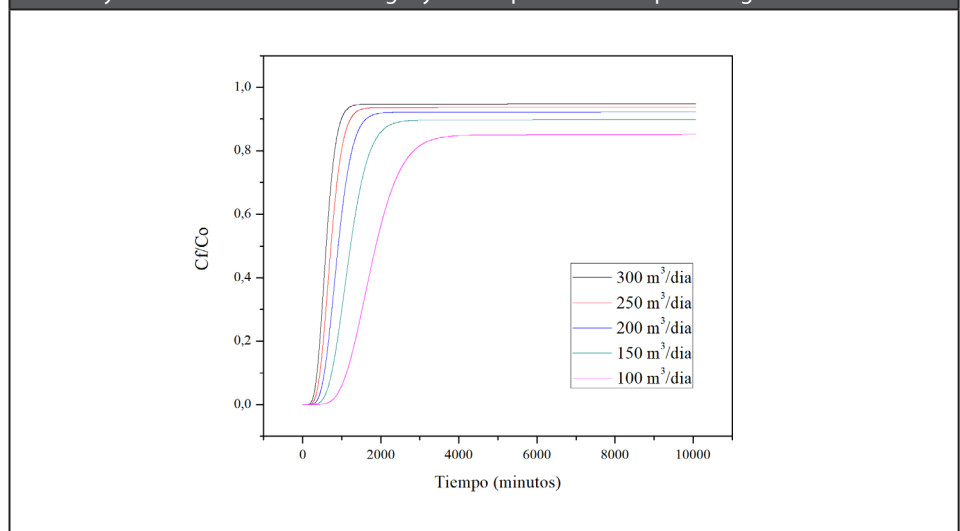
Los resultados obtenidos de la evaluación del modelo isotérmico Langmuir con el modelo cinético LDF, evidenciaron que al disminuir el caudal de entrada y aumentar la altura del lecho se presentó un incremento en los tiempos de ruptura y tiempos de saturación, como se puede observar en la Tabla 3. Este comportamiento se debe a que, al haber un caudal bajo y una altura elevada, el fluido que pasa por la columna presenta un aumento en el tiempo de residencia dentro del lecho dando como resultado una extensión en los tiempos de ruptura y tiempos de saturación.

3.2. Análisis de sensibilidad paramétrica

3.2.1. Efecto del caudal de entrada

Se examinó el impacto de la variación de los caudales de entrada en el proceso de adsorción de Ni (II) en solución en una columna de adsorción con una concentración inicial de 2000 mg/L y una altura de 5 metros. Los caudales evaluados fueron de 100 m³/día, 150 m³/día, 200 m³/día, 250 m³/día y 300 m³/día. Se puede evidenciar al trabajar con caudales elevados se presentaron tiempos de ruptura y tiempos de saturación bajos en comparación al trabajar con caudales altos, tal como se observa en la Figura 1. Esto se debe al aumento de ingreso de contaminante a la columna producido por el incremento de caudal el cual produce un aumento en la transferencia de masa del sistema, dando como resultados que en caudales más altos se llega al equilibrio más rápido. Lo anterior se ve reflejado en una disminución en el tiempo de residencia en la biomasa y de por ende una reducción del tiempo de vida útil de está, presentando así valores más bajos respecto a los tiempos de ruptura y saturación en caudales más altos. De igual manera, en la gráfica se observa que, un mayor caudal presenta mayores eficiencias, siendo para este caso: 94,8% para 300 m³/día, 93,8% para 250 m³/día, 92,3% para 200 m³/día, 89,8% para 150 m³/día y 85,1% para 100 m³/día (González-Delgado, Tejada-Tovar, et al., 2022; Guan et al., 2022).

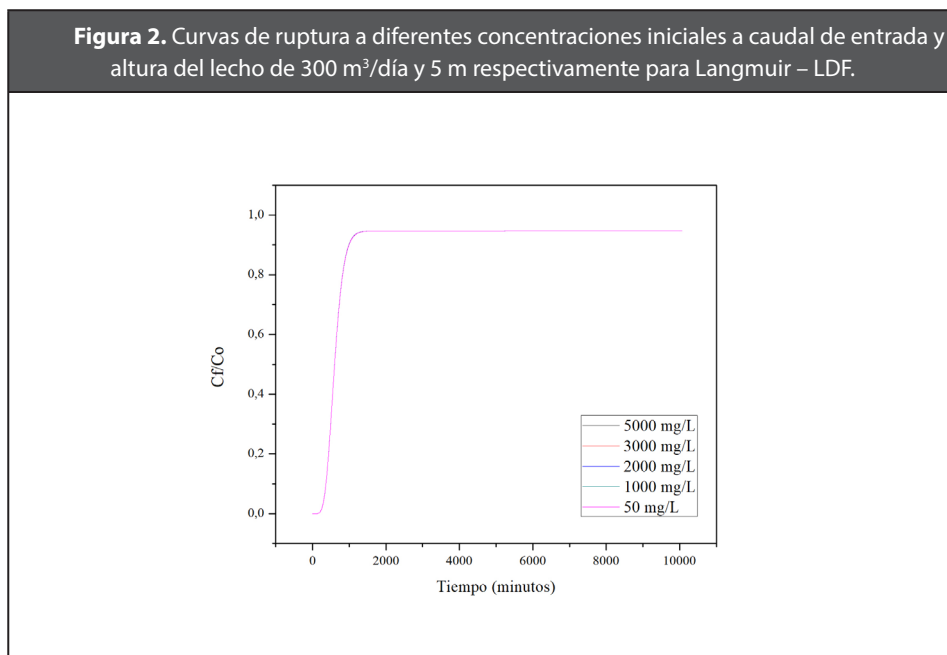
Figura 1. Curvas de ruptura a diferentes caudales de entrada a concentración inicial de Ni (II) y altura del lecho de 2000 mg/L y 5 m respectivamente para Langmuir – LDF.



3.2.2. Efecto de la concentración inicial de Ni (II)

Se examinó el impacto de la variación de la concentración inicial en el proceso de adsorción de Ni (II) en solución en una columna de adsorción con un caudal de entrada de 300 m³/día. y una altura de lecho fija de 5 metros. Las concentraciones estudiadas fueron de 5000mg/L, 3000mg/L, 2000mg/L, 1000mg/L y 50mg/L. Como se puede observar en la Figura 2. Se evidencia que el tiempo de saturación maneja una tendencia donde se alcanzan mayores tiempos a mayores concentraciones de Ni (II). Este cambio se debe a una mayor presencia de contaminantes, lo cual acelera el equilibrio de adsorción y disminuye la cantidad de sitios activos disponibles con el tiempo, generando una ralentización del proceso de adsorción en sus etapas finales. Por otro lado, se observa que la concentración, hasta cierto rango, no afecta significativamente la eficiencia del proceso, ya que para las concentraciones de 5000 mg/L, 3000 mg/L, 2000 mg/L y 1000 mg/L, se obtuvieron porcentajes de eficiencia con diferencias inferiores al 1% (Fang et al., 2022).

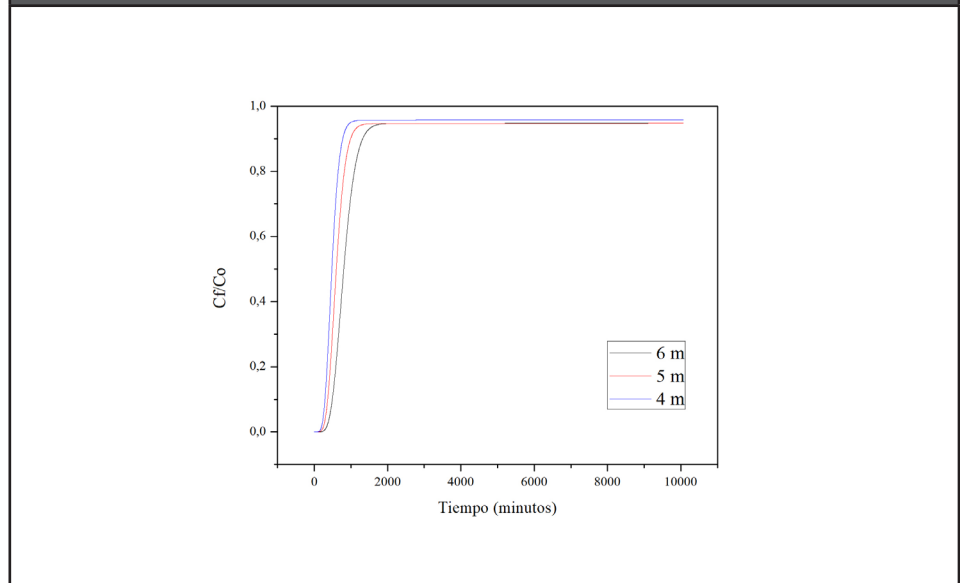
Figura 2. Curvas de ruptura a diferentes concentraciones iniciales a caudal de entrada y altura del lecho de 300 m³/día y 5 m respectivamente para Langmuir – LDF.



3.2.3. Análisis de sensibilidad paramétrica para la altura de lecho.

Se examinó el impacto de la variación de la altura del lecho en el proceso de adsorción de Ni (II) en solución en una columna de adsorción con un caudal de entrada de 300 m³/día. y una concentración inicial de 2000 mg/L. Las alturas estudiadas en este caso fueron de 4, 5 y 6 metros, según lo planteado en los factores a analizar presentados en la tabla 1. Como se puede observar en la figura 3 y en los datos provenientes de la tabla 3, al presentarse alturas más altas generan un tiempo de residencia mayor en la torre, prolongando los tiempos de ruptura y tiempos de saturación. El aumento de altura de lecho aumenta considerablemente la cantidad de sitios activos disponibles para adsorber los metales pesados, por lo tanto, un aumento en la altura permite una mayor capacidad de adsorción de níquel en la biomasa a base de cacao. Sin embargo, es de notar que la eficiencia suele ser más baja en alturas más altas como se puede observar en las tablas ya mencionadas con anterioridad. También como se observa en la figura 3, a menor altura se presentan mayores eficiencias, siendo 95,8% para 4 metros, 94,8% para 5 metros, 94,7% para 6 metros (Ali Abd & Roslee Othman, 2022; Zhang et al., 2019)

Figura 3. Curvas de ruptura a diferentes alturas de lecho a caudal de entrada y concentración inicial de Ni (II) de 300 m³/día y 2000 mg/L respectivamente para Langmuir – LDF.



El estudio actual utilizó tanto el modelo isotérmico Langmuir como modelo cinético LDF en diversas simulaciones de adsorción de Ni (II) en una columna empacada biomasa de *Theobroma cacao L.* Los resultados obtenidos presentaron resultados mejores en comparación a los reportados en la literatura (Hardyianto Vai Bahrún et al., 2021; Upadhyay et al., 2021) para diferentes metales pesados y biomásas empleadas. En estos hallazgos se destaca la influencia significativa de los parámetros en la eficacia del proceso dependiendo de las condiciones en las que se realicen las simulaciones, siendo el caudal de entrada > altura del lecho > concentración inicial, respectivamente. En la tabla 4 se presentan los parámetros seleccionados con los cuales se obtuvieron las mejores condiciones en este estudio.

Tabla 4. Parametrización de la Columna de adsorción

Parámetros	Unidad	Valores
Diámetro del lecho, m	m	
Porosidad del lecho	m ³ de vacío / m ³ de lecho	0,67
Densidad de Bulk	g/cm ³	0,0365
Coefficiente de transferencia de masa	1/s	1,37x10 ⁻⁴
Porosidad de lecho	-	0,6
Porosidad por vacío total	-	0,4
Altura del lecho	m	5
Caudal de entrada	m ³ /día	300
Concentración inicial de Ni (II)	mg/L	2000
q _{max} (cantidad máxima de soluto en la fase sólida)	(mg/g)	227,3484
b (Parámetro de Langmuir relacionado con la afinidad de los sitios de unión con el contaminante)	(L/mg)	0,0112

4. Conclusiones

Este trabajo tuvo como objetivo emplear herramientas de Ingeniería de procesos asistida por computador para modelar una columna operativa a escala industrial tendiente a la adsorción Ni (II) en solución acuosa aprovechando la biomasa de *Theobroma cacao L.* La elección

del modelo Langmuir-LDF para realizar las simulaciones de la columna de adsorción para la eliminación de Ni (II) mostró eficiencias de hasta el 95%. Además, mediante un análisis de sensibilidad paramétrica, se examinaron las repercusiones de variar los parámetros de altura del lecho, caudal de entrada y concentración inicial en el tiempo de ruptura (T.R) y el tiempo de saturación (T.S). Se investigaron diferentes rangos de caudales de entrada los cuales fueron de 100 m³/día, 150 m³/día, 200 m³/día, 250 m³/día y 300 m³/día, observando que el empleo del caudal más alto condujo en una disminución en los tiempos de ruptura y saturación, pero con un aumento en las eficiencias del proceso. También, se examinó rangos en la altura del lecho, siendo de 4 metros, 5 metros y 6 metros, evidenciando que trabajar con el valor más elevado ocasiona un aumento en los tiempos de ruptura y saturación, aunque la eficiencia obtenida disminuye. Por otro lado, se probaron concentraciones iniciales de 5000 mg/L, 3000 mg/L, 2000 mg/L, 1000 mg/L y 50 mg/L, y se observó que, al variar la concentración, la eficiencia del proceso no se veía afectada significativamente.

Todo lo expuesto anteriormente evidencia el potencial que posee una columna de adsorción empacada con *Theobroma cacao L* a escala industrial, justificado su viabilidad y construcción. Además, el empleo de herramientas computacionales como el software Aspen Adsorption resulta altamente beneficioso, ya que permite anticipar el desempeño de diversas configuraciones de columnas de adsorción con biomateriales a escala industrial, proporcionando así una base para comprender cómo los parámetros pueden influir en el proceso. Este enfoque, a su vez, tiene el potencial de captar el interés de industrias interesadas en desarrollar proyectos futuros que hagan uso de biosorbentes y la CAPE, así como en la eliminación de contaminantes en cuerpos de agua.

Nomenclatura

- b (L/mg): Parámetro de Langmuir relacionado con la afinidad de los sitios de unión con el contaminante.
- C_e (mg/L): Concentración de contaminante en la solución en el equilibrio.
- C_f/C_0 : Eficiencia.

- LDF: Modelo cinético de Resistencia lineal global.
- MTC (m/s): Coeficiente global de transferencia de masa.
- n: Efecto de la concentración inicial en la capacidad de adsorción.
- q_{\max} (mg/g): cantidad máxima de soluto en la fase sólida.
- T.R. (min): Tiempo de Ruptura.
- T.S. (min): Tiempo de Saturación.
- Carga instantánea de equilibrio del adsorbato en el adsorbente.

5. Referencias

- Aho, A.V. (2012) 'Computation and computational thinking', *Computer Journal*, 55(7), pp. 833-835. <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxs074>
- Allsop, Y. (2019) 'Assessing computational thinking process using a multiple evaluation approach', *International Journal of Child-Computer Interaction*, 19, pp. 30-55. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2018.10.004>
- Anderson, N.D. (2016) 'A Call for Computational Thinking in Undergraduate Psychology', *Psychology Learning and Teaching*, 15(3), pp. 226-234. <https://doi.org/10.1177/1475725716659252>
- Barr, D., Harrison, J. and Conery, L. (2011) 'Computational Thinking: A Digital Age Skill for Everyone', *Learning and Leading with Technology*.
- Barr, V. and Stephenson, C. (2011) 'Bringing computational thinking to K-12: What is involved and what is the role of the computer science education community?', *ACM Inroads*, 2(1), pp. 48-54. <https://doi.org/10.1145/1929887.1929905>
- Basogain-Olabe, X., Olabe-Basogain, M.Á. and Olabe-Basogain, J.C. (2015) 'Pensamiento Computacional a través de la Programación: Paradigma de Aprendizaje', *Revista de Educación a Distancia (RED)*, 46(46). <https://doi.org/10.6018/red/46/6>
- Basogain, X., Olabe, J., Rico, M., Rodríguez, L. and Miguel, A. (2017) 'Pensamiento computacional en las escuelas de Colombia', *Researchgate*, (July), p. 12.
- Bocconi, S., Chiocciariello, A., Dettori, G., Ferrari, A., Engelhardt, K., Kampylis, P. and Punie, Y. (2016) 'El Pensamiento Computacional en la Enseñanza Obligatoria (Computhink) Implicaciones para la política y la práctica', *Proceedings of the EdMedia 2016 Conference*, (June), pp. 1-43. <https://doi.org/10.2791/792158>
- Bordignon, F. and Iglesias, A. (2019) *Introducción al Pensamiento Computacional: Búsquedas y Ordenamiento*.
- Brennan, K. (2011) 'Computational thinking Concepts'. Available at: <http://scratched.gse.harvard.edu/resources/computational-thinking-concepts-march-2011-webinar.html> (Accessed: 20 June 2024).
- Brennan, K. and Resnick, M. (2012) 'New frameworks for studying and assessing the development of computational thinking', *Studies in Computational Intelligence*, 727. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64051-8_9

- Carmona-Mesa, J.A., Morales, S. and Villa-Ochoa, J.A. (2017) 'Pensamiento Computacional en la formación inicial de profesores de matemáticas', (December), p. 17. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33696.07688>
- Ceibal, P. (2017) '¿Qué aporta al aula el Pensamiento Computacional?'. Available at: <https://www.ceibal.edu.uy/es/articulo/que-aporta-al-aula-el-pensamiento-computacional> (Accessed: 20 June 2024).
- Chen, H.E., Sun, D., Hsu, T.C., Yang, Y. and Sun, J. (2023) 'Visualising trends in computational thinking research from 2012 to 2021: A bibliometric analysis', *Thinking Skills and Creativity*, 47(October 2022), 101224. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2022.101224>
- Codelearn (2019) '¿Qué es el pensamiento computacional?'. Available at: <https://codelearn.es/blog/que-es-pensamiento-computacional/> (Accessed: 20 June 2024).
- Csizmadia, A., Curzon, P., Dorling, M., Humphreys, S., Ng, T., Selby, C. and Woollard, J. (2015) *Computational Thinking: A Guide for Teachers*. Computing At School.
- CSTA and ISTE (2011) 'Operational definition of computational thinking for K-12 education'. Available at: <http://csta.acm.org/Curriculum/sub/CurrFiles/%0ACompThinkingFlyer.pdf> (Accessed: 20 June 2024).
- Cummins, K. (2016) 'Five reasons why computational thinking is an essential tool for teachers and students'. Available at: <https://www.edgalaxy.com/journal/2016/5/25/five-reasons-whycomputational-thinking-is-an-essential-tool-for-teachers-and-students> (Accessed: 20 June 2024).
- Curzon, P. (2015) 'Computational thinking: Searching to speak'. Available at: <https://cs4fndownloads.files.wordpress.com/2016/02/searchingtospeak-booklet.pdf> (Accessed: 20 June 2024).
- Cutumisu, M., Adams, C. and Lu, C. (2019) 'A Scoping Review of Empirical Research on Recent Computational Thinking Assessments', *Journal of Science Education and Technology*, 28(6), pp. 651-676. <https://doi.org/10.1007/s10956-019-09799-3>
- De Paula, B.H., Burn, A., Noss, R. and Valente, J.A. (2018) 'Playing Beowulf: Bridging computational thinking, arts and literature through game-making', *International Journal of Child-Computer Interaction*, 16, pp. 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2017.11.003>
- Denning, P.J. (2009) 'The profession of IT: Beyond computational thinking', *Communications of the ACM*, 52(6), pp. 28-30. <https://doi.org/10.1145/1516046.1516054>
- European Council (2006) 'Recommendation of the European Parliament and the Council on key competencies for lifelong learning', *Official Journal of the European Union*, (March 2002), pp. 10-18.
- Formación en Red del INTEF (2017) '¿Qué es el pensamiento computacional?'. Available at: http://formacion.intef.es/pluginfile.php/87694/mod_imscp/content/9/qu_es_el_pensamiento_computacional.html (Accessed: 20 June 2024).
- Fraillon, J., Ainley, J., Schulz, W., Friedman, T. and Duckworth, D. (2018) *Preparing for Study, life in a digital world: The IEA International Computer and Information Literacy 71, COMPUTERS IN THE SCHOOLS Educational*. International Association for the Evaluation of Educational Achievement (IEA). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38781-5>
- García-Peñalvo, F.J. (2016) 'What Computational Thinking Is', *Journal of Information Technology Research*, 9(3), pp. v-viii. <https://doi.org/10.1145/1539024.1509053>
- García-Peñalvo, F., Reimann, D., Tuul, M., Rees, A. and Jormanainen, I. (2016) 'An overview of the most relevant literature on coding and computational thinking with emphasis on the relevant issues for teachers KA2 project "TACCLE 3 – Coding" (2015-1-BE02-KA201-012307)', (October), p. 72. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13111.01440>

- González-González, C.S. (2019) 'State of the art in the teaching of computational thinking and programming in childhood education', *Education in the Knowledge Society*, 20, pp. 1-15. https://doi.org/10.14201/eks2019_20_a17
- Google for Education (2017) 'Computational Thinking Overview'. Available at: <http://edu.google.com/resources/programs/exploring-computationalthinking/#!Ct-overview> (Accessed: 20 June 2024).
- Grover, S. and Pea, R. (2018) 'Computational Thinking: A Competency Whose Time Has Come', *Computer Science Education*, (December). <https://doi.org/10.5040/9781350057142.ch-003>
- Huerta Jimenez, C.S. and Albo Velázquez, M. (2021) 'Pensamiento computacional como una habilidad genérica: una revisión sistemática', *Ciencia Latina*, 5(1), pp. 1055-1078.
- Iglesias, A. and Bordignon, F. (2020) *Introducción al pensamiento computacional*. (U.P.N. y E.SE., Ed.).
- International Society for Technology in Education (2015) *CT leadership toolkit*.
- Iturbide, J.Á.V. and Lope, M.M. (2021) 'Análisis del "pensamiento computacional" desde una perspectiva educativa', *Revista de Educación a Distancia (RED)*, 21(68). <https://doi.org/10.6018/red.484811>
- Kalelioglu, F., Gülbahar, Y. and Kukul, V. (2016) 'A Framework for Computational Thinking Based on a Systematic Research Review', *Baltic J. Modern Computing*, 4(3), pp. 583-596.
- Llorens Largo, F., García Peñalvo, F.J., Molero Prieto, X. and Vendrell Vidal, E. (2017) 'La enseñanza de la informática, la programación y el pensamiento computacional en los estudios preuniversitarios', *Education in the Knowledge Society (EKS)*, 18(2), pp. 7-17. <https://doi.org/10.14201/eks2017182717>
- Lu, J.J. and Fletcher, G.H.L. (2009) 'Thinking about computational thinking', *SIGCSE Bulletin Inroads*, 41(1), pp. 260-264. <https://doi.org/10.1145/1539024.1508959>
- Mannila, L., Dagiene, V., Demo, B., Grgurina, N., Mirolo, C., Rolandsson, L. and Settle, A. (2014) 'Computational thinking in K-9 education', *ITiCSE-WGR 2014 - Working Group Reports of the 2014 Innovation and Technology in Computer Science Education Conference*, (June), pp. 1-29. <https://doi.org/10.1145/2713609.2713610>
- Manso, J. and Monarca, H. (2016) 'Concepciones de la ocde y la unión europea sobre el desarrollo profesional docente', *Journal of Supranational Policies of Education*, (5), pp. 137-155. <https://doi.org/10.15366/jospoe2016.5>
- Marin, E.M. (2020) *Desarrollo del pensamiento computacional en estudiantes de ingenierías para la comprensión óptima de la matemática*.
- Maris, S. (2019) 'Pensamiento computacional: por qué incluirlo en el proceso de aprendizaje'. Available at: <https://www.net-learning.com.ar/blog/herramientas/pensamiento-computacional-por-que-incluirlo-en-el-proceso-de-aprendizaje.html> (Accessed: 20 June 2024).
- Mishra, P., Yadav, A., Henriksen, D., Kereluik, K., Terry, L., Fahnoe, C. and Terry, C. (2013) 'Rethinking Technology & Creativity in the 21st Century', *TechTrends*, 57(3), pp. 10-14. <https://doi.org/10.1007/s11528-013-0655-z>
- Motoa, S.S.P. (2019) 'Pensamiento computacional', *Revista de Educación y Pensamiento*, pp. 107-111.
- Olabe, X.B. and Parco, M.E.O. (2020) 'Integration of computational thinking in compulsory education. Two pedagogical experiences of collaborative learning online', *Revista de Educación a Distancia*, 20(63). <https://doi.org/10.6018/RED.409481>
- Ortega, B.R. (2017) *Pensamiento computacional y resolución de problemas*. Repositorio UAM. Universidad Autónoma de Madrid.

- Papert, S. (1980) *Teaching children to be mathematicians vs. teaching about mathematics*.
- Papert, S. (1996) 'An Exploration in the Space Of Mathematics education', *International Journal of Computers for Mathematical Learning*. <https://doi.org/10.1007/BF00191473>
- Pérez-Narváez, H.O. and Roig-Vila, R. (2015) 'Entornos de programación no mediados simbólicamente para el desarrollo del pensamiento computacional. Una experiencia en la formación de profesores de Informática de la Universidad Central del Ecuador', *Revista de Educación a Distancia (RED)*, 46(46).
- Piatti, A., Adorni, G., El-Hamamsy, L., Negrini, L., Assaf, D., Gambardella, L. and Mondada, F. (2022) 'The CT-cube: A framework for the design and the assessment of computational thinking activities', *Computers in Human Behavior Reports*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2021.100166>
- Polanco, N.P., Ferrer, S.P. and Fernández, M.R. (2021) 'Aproximación a una definición de pensamiento computacional', *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 24(1), pp. 55-76. <https://doi.org/10.5944/ried.24.1.27419>
- Raja, T. and Jun, M. (2014) 'Is coding the new literacy?', *Mother Jones*.
- Repenning, A. and Basawapatna, A. (2017) 'Principles of Computational Thinking', *Emerging research, practice, and policy on computational thinking*, (April), pp. 291-305. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52691-1_18
- Riley, D.D. and Hunt, K.A. (2014) *Computational thinking for the modern problem solver*.
- Roig-Vila, R. and Moreno-Isac, V. (2020) 'El pensamiento computacional en educación. Análisis bibliométrico y temático', *Revista de Educación a Distancia (RED)*, 20(63). <https://doi.org/10.6018/red.402621>
- Román-González, M., Pérez-González, J.C. and Jiménez-Fernández, C. (2017) 'Which cognitive abilities underlie computational thinking? Criterion validity of the Computational Thinking Test', *Computers in Human Behavior*, 72, pp. 678-691. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.08.047>
- Román, M.G. (2016) *Codigoalfabetización y pensamiento computacional en Educación Primaria y Secundaria: validación de un instrumento y evaluación de programas*.
- Roncoroni, U.O. and Bailón, J. (2020) 'Pensamiento computacional. Alfabetización digital sin computadoras', *Icono14*, 18(2), pp. 379-405. <https://doi.org/10.7195/RI14.V18I2.1570>
- School, C. at (2015) 'Computational thinking'. Available at: <http://barefootcas.org.uk/barefoot-primary-computing-resources/concepts/computational-thinking/> (Accessed: 20 June 2024).
- Segredo, E., Miranda, G. and León, C. (2017) 'Hacia la educación del futuro: El pensamiento computacional como mecanismo de aprendizaje generativo', *Education in the Knowledge Society (EKS)*, 18(2), pp. 33-58. <https://doi.org/10.14201/eks2017182335>
- Selby, C.C. (2015) 'Relationships: Computational thinking, Pedagogy of programming, and Bloom's taxonomy', *ACM International Conference Proceeding Series*, 09-11-Nove, pp. 80-87. <https://doi.org/10.1145/2818314.2818315>
- Selby, C. and Woollard, J. (2013) *Computational thinking: the developing definition*. Universidad de Southampton.
- Shute, V.J., Sun, C. and Asbell-Clarke, J. (2017) 'Demystifying computational thinking', *Educational Research Review*, 22, pp. 142-158. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2017.09.003>
- Snalune, P. (2015) 'The Benefits of Computational Thinking', (1), pp. 1-27. <https://doi.org/10.1093/itnow/bwv111>

- Syśło, M.M. and Kwiatkowska, A.B. (2013) 'Informatics for all high school students: A computational thinking approach', *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 7780 LNCS(February), pp. 43-56. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36617-8_4
- Tang, X., Yin, Y., Lin, Q., Hadad, R. and Zhai, X. (2020) 'Assessing computational thinking: A systematic review of empirical studies', *Computers and Education*, 148(December 2019), 103798. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103798>
- The British Royal Society (2012) 'Shut down or restart?', *British Journal of Educational Technology*.
- Tsai, M., Liang, J. and Hsu, C. (2021) 'The Computational Thinking Scale for Computer Literacy Education', *Journal of Educational Computing Research*, 59(4), pp. 579-602. <https://doi.org/10.1177/0735633120972356>
- UNIR, U. I. de la R. (2021) '¿Qué es el pensamiento computacional?', Recuperado de <https://www.unir.net/educacion/revista/pensamiento-computacional/> (Accessed: 20 June 2024).
- Valverde-Berrocoso, J., Fernández-Sánchez, M.R. and Garrido-Arroyo, M.C. (2015) 'El pensamiento computacional y las nuevas ecologías del aprendizaje', *Revista de Educación a Distancia (RED)*, (46).
- Wing, J., Cuny, J. and Snyder, L. (2010) 'Research notebook: Computational thinking—What and why?', Recuperado de <http://www.cs.cmu.edu/link/research-notebook-computational-thinking-what-and-why> (Accessed: 20 June 2024).
- Wing, J.M. (2006) 'Computational thinking', *Communications of the ACM*, 49(3), pp. 33-35. <https://doi.org/10.1145/1118178.1118215>
- Yeh, K.C., Xie, Y. and Ke, F. (2011) 'Teaching computational thinking to non-computing majors using spreadsheet functions', *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE*, (March 2014). <https://doi.org/10.1109/FIE.2011.6142980>
- Zapata-Ros, M. (2015) 'Pensamiento computacional: Una nueva alfabetización digital', *Revista de Educación a Distancia (RED)*, 46(46).
- Zapata-Ros, M. (2019) 'Pensamiento computacional desenchufado', *Education in the Knowledge Society (EKS)*, 20(May), p. 29. https://doi.org/10.14201/eks2019_20_a18