

Estudio dinámico de adsorción de Ni (II) sobre residuos de *Musa aab simmonds*.



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 19/ Edición N.38
Junio-Diciembre de 2022
Reia3819 pp. 1-17

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Ruiz-Paternina, E.; Frías-González, J.;
Blanco-González, G.; Tejada-Tovar, C.;
Villabona-Ortíz, A. (2022).

Estudio dinámico de adsorción de
Ni (II) sobre residuos de *Musa aab*
simmonds.

Revista EIA, 19(38), Reia3819.
pp. 1-17 [https://doi.org/10.24050/
reia.v19i38.1537](https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1537)

✉ Autor de correspondencia:

Tejada-Tovar, C. (Candelaria):
M.Sc. En Ingeniería Ambiental,
Ingeniera química. Universidad de
Cartagena.
Correo electrónico:
ctejadat@unicartagena.edu.co

Recibido: 06-06-2021

Aceptado: 22-01-2022

Disponible online: 01-06-2022

ÉRIKA RUIZ-PATERNINA¹
JESÚS FRÍAS-GONZÁLEZ¹
GERLYN BLANCO-GONZÁLEZ¹
✉ CANDELARIA TEJADA-TOVAR¹
ANGEL VILLABONA-ORTÍZ¹

1. Universidad de Cartagena

Resumen

Se estudió la dinámica de adsorción de Ni (II) a partir de la torta residual del proceso de extracción de almidón de plátano en columna de lecho fijo variando la temperatura y altura de lecho. La biomasa se caracterizó por análisis elemental y FTIR. La concentración final del ion en solución se determinó por espectrofotometría de absorción atómica. Se encontró que los grupos funcionales hidroxilos y carboxilos son los de mayor protagonismo en la retención del ion. Del análisis ANOVA se determinó que las variables estudiadas en la remoción del Ni (II) no presentan efectos significativos sobre el mismo. De la curva de ruptura se encontró que la capacidad de adsorción máxima de la columna fue de 18.72 mg/g. El modelo de Dosis de Respuesta es el que mejor describe el proceso de adsorción, concluyendo que la torta residual utilizada es una alternativa de bajo costo muy eficiente en la remoción de Ni (II) a condiciones ambientales.

Palabras clave: adsorción continua, curva de ruptura, metal pesado, torta residual.

Dynamic study of NI (II) adsorption onto *Musa aab simmonds* residue.

Abstract

User demographics, perceptions, and motivation data obtained from actual observation and experience surveys provide contextualized and first-hand information for game designers. However, this type of information can be misinterpreted if it is presented as numbers. Contextual Design (CD) is a user-centered method that allows a better understanding of the user's work environment, as well as the requirements that the interactive systems must have to cover their needs. According to the CD, the user *Personas* (also called archetypes) are representations of users created to establish behaviors, likes and motivations of a representative group of users who share common patterns. These types of profiles can represent user groups during the design and development process of a videogame, thus allowing a more focused design. This paper describes step by step the process of designing user *Personas* for a group of 25 participants with stroke. This information was obtained from contextual interviews and gaming experience surveys, which allowed a more homogeneous interpretation of the dislikes, limitations and motivations of the participants. The CD methodology showed to be very useful, generating four user profiles, which were used for the creation of a serious video game in virtual reality that allows therapeutic support in a physical rehabilitation process for people with stroke. Finally, this work presents the preliminary design of the videogame and the importance of the information in the creation of user models.

Key Words: continuous adsorption, breakthrough curve, heavy metal, residual cake

1. Introducción

El níquel ocurre de forma natural en la corteza terrestre combinado con otros elementos; se encuentra en todos los suelos y es liberado por volcanes (Altino, Costa, & Da Cunha, 2017). En el ambiente se encuentra principalmente combinado con oxígeno o azufre en forma de óxidos o sulfuros (Genchi et al., 2020). Los compuestos de níquel se usan para niquelado, colorear cerámicas, fabricar baterías y como catalizadores, lo cual ha fomentado la contaminación de los cuerpos hídricos a causa de la industrialización que a nivel mundial ha sido uno de los temas de mayor preocupación para la comunidad académica (Moino et al., 2017). El vertimiento de efluentes con presencia de metales pesados tales como el níquel genera una atención mayor debido al impacto tóxico sobre las especie animal que produce este por su naturaleza carcinogénica, además la exposición a altos niveles en humanos está relacionada con la dermatitis, la fibrosis pulmonar, las enfermedades cardiovasculares y renales, la función pulmonar reducida y el cáncer de pulmón (Liao et al., 2016).

Toda esta problemática asociada al impacto toxico que genera el níquel ha llevado a la sociedad científica en general a explorar distintas metodologías convencionales basadas en tratamientos físico-químicos que incluyen la precipitación química, el intercambio iónico, la filtración de membranas y la electroquímica para la eliminación de níquel (Azadi, Saadat, & Karimi-Jashni, 2018). Sin embargo, estos procesos tienen desventajas significativas como la eliminación incompleta, el alto costo y el problema de la generación de segundos contaminantes, producto de los residuos generados durante estos procesos, que dificultan su promoción y desarrollo en el tratamiento de las aguas residuales contaminadas con níquel (Li et al., 2018).

Actualmente, la adsorción se considera un buen método para la eliminación de un amplio espectro de sustancias tóxicas presentes en aguas residuales, como metales pesados y contaminantes emergentes (Meneguín et al., 2017). La bioadsorción utiliza residuos lignocelulósicos, que son baratos y de alta disponibilidad, y podrían ser útiles en el tratamiento de efluentes (Hokkanen, Bhatnagar, & Sillanpää, 2016). Así, la bioadsorción de níquel se presenta como un método apropiado debido a su alta eficacia y bajo costo por los materiales adsorbentes utilizados, puesto que son residuos en su mayoría orgánicos (Herrera-Barros et al., 2020). Otros méritos del método de biosorción incluyen la reutilización de biosorbentes, el corto tiempo de operación, la posibilidad de recuperación e inmovilización del contaminante, y la ausencia de producción de contaminantes secundarios (Azimi et al., 2017). Se resalta que el ciclo de vida de estas biomásas se cierra con la inmovilización de los contaminantes retenidos en la biomasa mediante técnicas de encapsulamiento e inactivación (Villabona-Ortíz et al., 2019). En éste sentido, se ha reportado en estudios previos que luego de la inactivación térmica del bagazo de palma de aceite se obtuvo porcentajes máximos de desorción de 1.06 y 1.1% de Ni⁺² y Pb⁺² respectivamente usando HNO₃ 0.1 M (C. Tejada-Tovar et al., 2018).

Si bien actualmente se han utilizado distintos adsorbentes tales como: resinas (Moscatello et al., 2018), biomásas (Mishra, Dutt, & Kumar, 2016), polímeros (Barquilha et al., 2017) y algunos desechos industriales (Valencia et al., 2019), el siguiente estudio propone la implementación de la torta residual del proceso de extracción de almidón de plátano (*Musa AAB Simmonds*) como bioadsorbente en la remoción de Ni (II). Los experimentos se realizaron en sistema continuo variando el efecto de la altura del lecho y la temperatura sobre la eficiencia de remoción.

2. Metodología

2.1. Obtención, preparación y caracterización de la biomasa

El plátano (*Musa AAB simmonds*) recolectado procedió de fincas en Santa Rosa y Villanueva, Bolívar-Colombia. El plátano fue sometido a un proceso de pelado y rebanado donde se cortó y se lavó varias veces con agua destilada para eliminar las diferentes impurezas, luego fue remojado en NaOH al 0.25% y enfriado a 5 °C durante 20 horas, para posteriormente ser licuado durante 1 min. Luego del proceso de maceración se obtuvo un producto rico en almidón el cual se filtró con tela franela para separar el almidón de la torta residual de dicho proceso, este último siendo la biomasa de interés en el presente estudio, se le ajustó el pH hasta 7 con HCl 2M, para luego ser retirado por una nueva filtración. Luego, esta torta residual fue expuesta a radiación solar hasta obtener masa constante (Maniglia & Tapia-bl, 2016). Posterior al proceso de secado, el tamaño de la torta residual fue reducido mediante un molino de rodillo para obtener partículas pequeñas de biomasa. La clasificación de los tamaños de partícula se realizó en una tamizadora tipo Shaker a través de una serie de tamices de: 2 mm y 1 mm cuyos tamaños fueron usados a lo largo de esta investigación. La caracterización de la biomasa fue realizada mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), determinando los grupos funcionales de la biomasa que pueden participar en la adsorción del metal y por análisis elemental.

2.2. Preparación de solución sintética

Para la preparación de las soluciones sintéticas de Ni (II) el reactivo agregado en agua desionizada para obtener la solución a 100 ppm fue el sulfato de níquel (NiSO₄). Para

la preparación, por cada litro de solución se agregaron 4.48 g de sulfato de níquel. El pH se ajustó a 5, usando soluciones de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio 2M.

2.3. Ensayos de adsorción, configuración y operación de la columna de lecho fijo

Los experimentos se llevaron a cabo en una columna de acrílico, con diámetro interno de 4.1 cm y altura de 15 cm, precedido de un tanque de acrílico elevado de 4 litros de volumen máximo de contenido. La solución que contuvo los iones de Ni (II) fluyó hacia la columna por gravedad, con un caudal de 45 ml/min ajustado por medio de una válvula de globo. La columna se empacó con la biomasa obtenida con tamaños de partícula entre 1 y 2 mm. La altura de lecho de la columna y la temperatura estuvo configurada de acuerdo al diseño experimental. La variación y control de la temperatura se realizó por medio de un controlador de temperatura REX C-100. Las muestras para medir la concentración final de los iones presentes en la solución fueron tomadas en la salida inferior de la columna, determinando la concentración final por espectrofotometría de absorción atómica.

2.4. Diseño experimental

El procedimiento experimental de la presente investigación se desarrolló por medio del software *STATGRAPHICS CENTURION XVI. II* de factor continuo lineal, en superficie de respuesta de tipo compuesto central: Estrella. En este diseño experimental se analizaron los posibles efectos de los factores: altura de lecho (15. 50. 30. 65. 100 y 114.5 mm) y temperatura (33. 40. 55. 70 y 76 °C) sobre la eficiencia de adsorción de Ni (II), para un combinado total de 16 experimentos. La eficiencia de adsorción se calculó usando la ecuación 1:

$$\frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad (1)$$

Donde C_i y C_f son las concentraciones a la entrada y a la salida de la columna.

2.5. Ajuste a modelos de adsorción en sistemas continuo

Este ajuste fue realizado haciendo uso del software OriginPro 8. Los modelos usados para tal propósito fueron los siguientes:

Modelo del tiempo de servicio del lecho (Bed Dept Service Time) "BDST": Este mide físicamente la capacidad del lecho en distintos tiempos de avance, ignorando la resistencia a la transferencia de masa intraparticular debido a que el adsorbato se adsorbe directamente en la superficie del bioadsorbente (Jafari & Jamali, 2016). El modelo se puede emplear para determinar la altura del lecho óptima para un tiempo específico, este es descrito por la ecuación 2:

$$\frac{C_o}{C} = \frac{1}{1 + EXP \left[K_{BDST} C_o \left(\frac{N_o L}{v C_o} \right) - t \right]} \quad (2)$$

Donde N_0 es la capacidad de bioadsorción del lecho (mg/L), v es la velocidad lineal del flujo de la solución metálica a través del lecho (cm/min), K_{BDST} es la constante de la velocidad de adsorción que describe la transferencia de masa de la fase líquida a la fase sólida (L/mgmin), L es la altura del lecho (cm), C_0 es la concentración inicial de soluto (mg/L), C la concentración deseada de soluto (mg/L), t es tiempo de residencia de la disolución en la columna en horas.

Modelo de Thomas (Th): El modelo de Thomas es de tipo dinámico y sigue la cinética de adsorción de Langmuir. En este se considera que la dispersión axial es despreciable en el lecho, ya que la fuerza impulsora obedece a una cinética de segundo orden con reacción reversible, dada por la ecuación 3:

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + EXP \left[\frac{K_{th}}{Q} (q_0 X - C_0 Q t) \right]} \quad (3)$$

Donde K_{th} , es la constante de Thomas (ml/min⁻¹ mg⁻¹); q_0 , es la concentración máxima de soluto en la fase solida (mg/g); X , es la cantidad de adsorbente en la columna (g), Q es la velocidad de flujo (ml/min) y V (L) es el volumen del efluente en el tiempo de operación (Chao, Chang, & Nieva, 2014).

Modelo de Yoon-Nelson (YN): Este modelo relaciona al igual que el modelo de Thomas, el parámetro adimensional C/C_0 con el tiempo de operación mediante dos parámetros K_{YN} y τ correspondiente a la constante cinética y al tiempo para retener el 50% del adsorbato inicial respectivamente. La ecuación 4 representa este modelo:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{Exp(K_{YN}t - \tau K_{YN})}{1 + Exp(K_{YN}t - \tau K_{YN})} \quad (4)$$

Donde K_{YN} es la constante de proporcionalidad de Yoon-Nelson en min⁻¹. es el tiempo requerido para retener el 50% del adsorbato inicial (Saadat, Hekmatzadeh, & Karimi Jashni, 2016).

Modelo de Dosis-Respuesta (DR): Aunque es usado en farmacología para describir diferentes tipos de procesos, está siendo actualmente aplicado para describir la adsorción en columnas (Lara et al. 2016). Este modelo puede ser representado por la Ecuación 5:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \frac{1}{1 + \left[\frac{C_0 * Qt}{q_0 X} \right]^a} \quad (5)$$

Donde a es la constante del modelo, q_0 . concentración máxima de soluto en la fase sólida (mg/g), X , es la cantidad de adsorbente en la columna (g) y Q es la velocidad de flujo (mL/min) (Martín-Lara et al., 2017).

3. Resultados

3.1. Caracterización de la biomasa

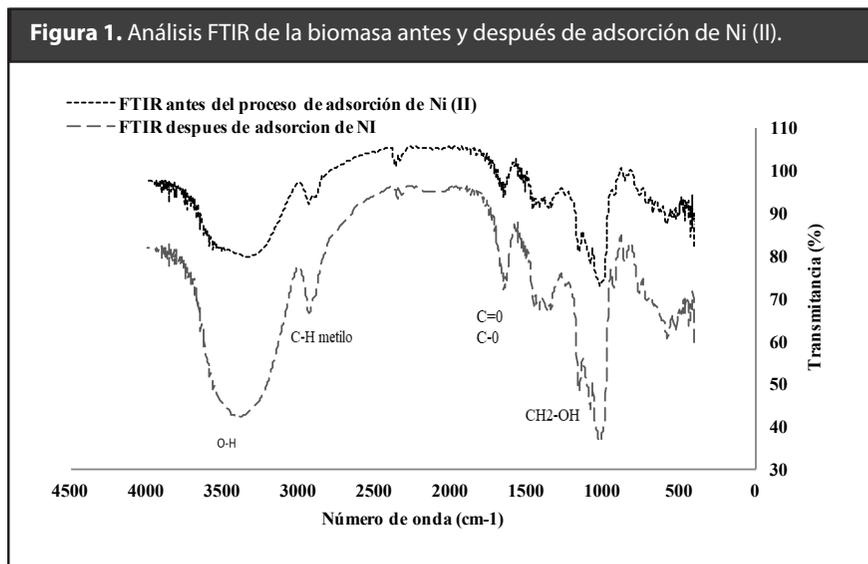
De la caracterización elemental mediante diversos métodos analíticos, se encontró que el elemento en mayor porcentaje en la torta residual de almidón de plátano fue el carbono con un 47.74% de composición, seguido del oxígeno e hidrogeno. Los resultados de los análisis se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis elemental de la torta residual de plátano.

Parámetros		Métodos
Azufre, %	0.37	AOAC 975.53
Carbono, %	47.74	AOAC 949.12
Hidrogeno, %	15.27	AOAC 949.12
Nitrógeno, %	0.58	AOAC 984.13
Oxígeno, %	23.98	AOAC 963.29

La remoción de los metales pesados de una solución acuosa en materiales lignocelulósicos está relacionada con la presencia de varios grupos funcionales en su superficie (hidroxilo, carbonilo, fosfato, amino, tiol), y aunque su presencia no garantiza una eficiente remoción de los metales, ya que este proceso es afectado por varios factores como el número de sitios activos, su accesibilidad, estado químico y afinidad por el metal, si depende grandemente del tipo de compuestos y elementos presentes, siendo en los compuestos lignocelulosicos importante la celulosa por su estabilidad química y fuerza mecánica, aunque tenga grupos hidroxil libres limitados ya que la mayoría ya están involucrados en la formación de puentes de hidrogeno (Šoštarić et al., 2018).

Con el objetivo de determinar los grupos funcionales presentes en la biomasa que intervienen en la adsorción de Ni (II), se sometió la torta residual al análisis FTIR antes y después del proceso de adsorción del ion metálico en estudio, como lo muestra la Figura 1.



De la figura 1 se destacan los registros entre las longitudes de onda entre 3000 y 3500 cm^{-1} de grupos funcionales O-H, así como también entre 3200 y 3500 cm^{-1} pueden aparecer aminas y pequeñas señales de sobre tono del carbonilo por vibraciones de estiramiento del enlace O-H (Singh & Shukla, 2017). El pico de 2927.94 cm^{-1} es atribuido a posibles vibraciones de C-H metilo, metileno y grupos metoxi (Romero-Cano et al., 2017), entre 2000 y 2500 cm^{-1} se puede observar señales de alquinos y ácidos carboxílicos, como una señal ancha por puentes de hidrogeno con patrón de sobre tonos de los ácidos carboxílicos por estiramiento del O-H. Seguido a esto el FTIR registra picos cercanos a 1650 cm^{-1} que indica la presencia de grupos funcionales de celulosa, hemicelulosa y lignina debido a estiramiento de C=O y C-O por las vibraciones de grupos carboxilos de pectina, hemicelulosa y lignina (Sreenivas et al., 2014), así como también puede indicar la presencia de anillos aromáticos debido a vibraciones de hidrogeno que representan el estiramiento de C=C. Con la presencia de Ni (II) en la biomasa se evidencia que después del proceso de adsorción se dio una variación de la frecuencia que puede atribuirse a la unión de los iones de Ni (II) a los diferentes grupos funcionales presentes en la biomasa, como se corrobora en el cambio de la intensidad y ancho del pico de adsorción de 2341 cm^{-1} debido a la interacción de puentes de hidrogeno con patrones de sobre tono que indican la presencia de ácidos carboxílicos (-COOH), por el estiramiento del O-H, al igual que en el cambio de intensidad del pico de adsorción a 2927.94 cm^{-1} atribuido a las vibraciones de C-H metilo, metileno y grupos metoxi presentes en la biomasa que facilitan el proceso de adsorción y justifican los altos porcentajes de retención de iones de Ni (II) a condiciones ambiente.

3.2. Ensayos de adsorción

Los resultados de la remoción de la torta residual de almidón de plátano en las distintas configuraciones de operación en la columna de lecho fijo donde se desarrollaron los ensayos de adsorción de Ni (II) se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Matriz de resultados de ensayos de adsorción.

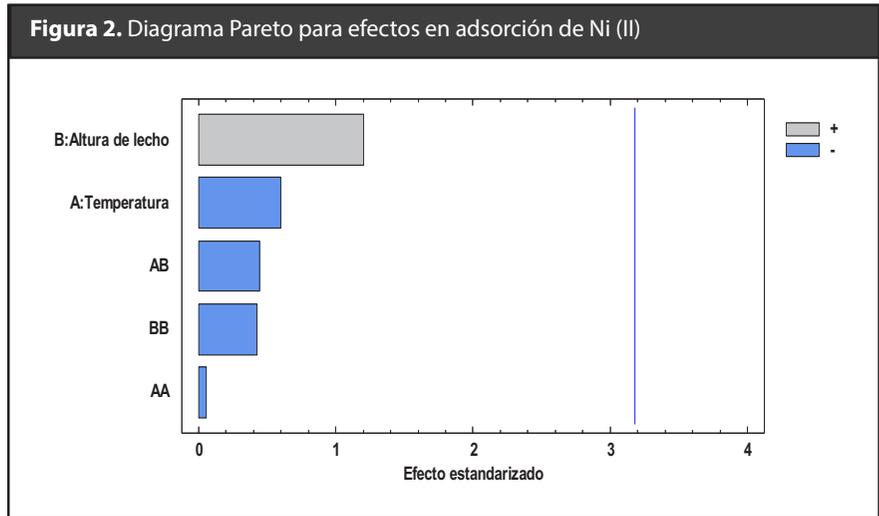
Altura de lecho (mm)	Temperatura (°C)	% Remoción
65	33	98.13
100	40	98.28
30	40	94.81
114.5	55	96.73
65	55	97.20
15.5	55	97.13
100	70	97.15
30	70	95.00
65	76	97.01

En la tabla 2 se observa que los valores de remoción alcanzados en las distintas configuraciones de experimentación no difieren significativamente, presentando a su vez la alta eficiencia de adsorción de Ni (II) por el lecho. Así del análisis estadístico de varianza ANOVA, (Tabla 3) se evidencia la variabilidad de remoción para cada uno de los efectos, comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental.

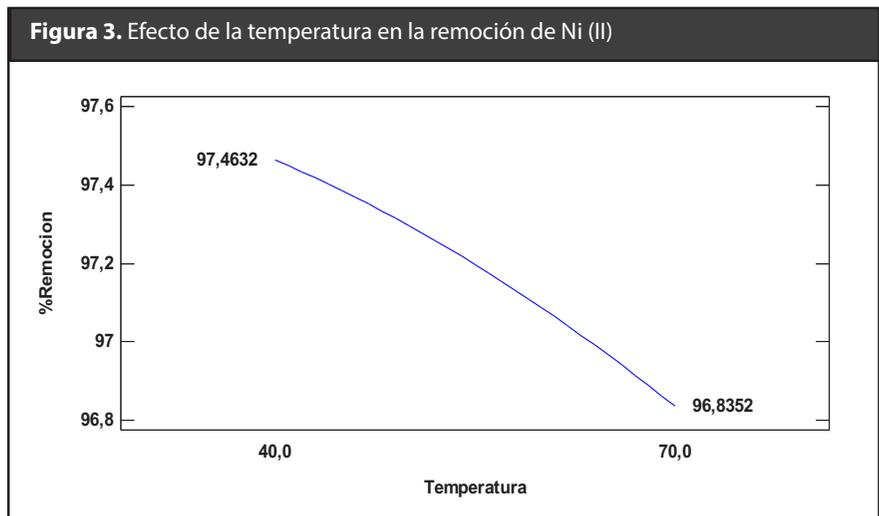
Tabla 3. ANOVA para remoción de Ni (II)

Fuente	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor-P
A:Temperatura	0.788	0.788	0.59
B:Altura de lecho	3.187	3.187	0.31
AA	0.006	0.006	0.95
AB	0.438	0.438	0.68
BB	0.398	0.398	0.69
Error total	6.600	2.200	
Total (corr.)	11.586		

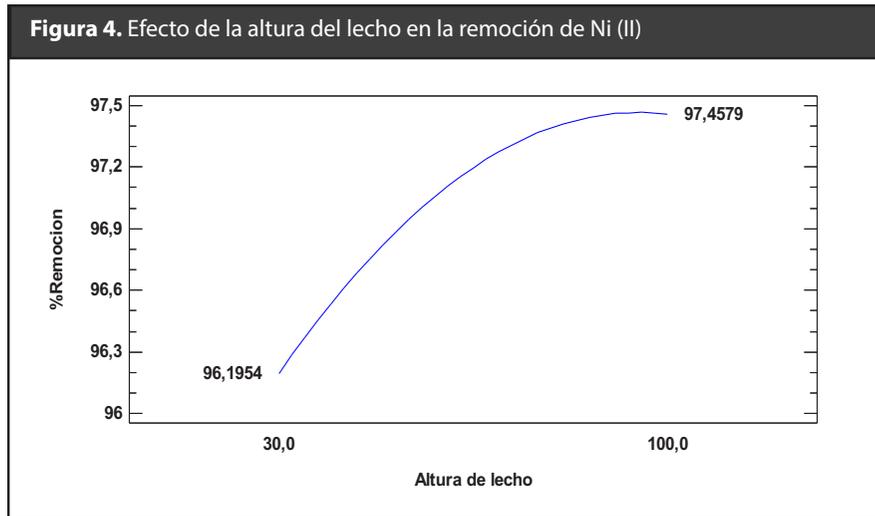
El análisis inicial de los datos obtenidos para los ensayos con Ni (II), muestra que el estimado tiene una desviación estándar del 1.48 % donde el estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica 43.03% de la variabilidad en remoción, y los factores independientes (Altura de lecho y Temperatura) tienen un valor-P mayor que 0.05. lo que justifica la baja incidencia en el proceso de remoción de iones de Ni (II) tal como se evidencia en el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados en la figura 2.



El diagrama de Pareto estándar para remoción de Ni (II), expone la influencia nula que tiene el factor de temperatura sobre el proceso de adsorción de iones de Ni (II) con la torta residual de almidón de plátano. La figura 3 muestra el perfil de remoción presentado para el efecto de la temperatura en el proceso, donde se observa que hay una disminución con el aumento de la temperatura, sin embargo no es significativo tal cambio. Esto se debe al hecho de que a una temperatura más baja, los iones metálicos presentes en la solución podrían interactuar más con los sitios de unión. A medida que aumenta la temperatura, la movilidad de los iones aumenta y las fuerzas de atracción entre el sorbente y los iones metálicos disminuyen, disminuyendo así la eficiencia de sorción del sorbente (Abbas et al., 2017).



La altura del lecho al igual que la temperatura en el proceso de adsorción no tiene una influencia relevante en la remoción de Ni (II), así se muestra en la figura 4. donde a una altura de lecho de 30 mm podría llevarse en efecto una remoción del 96.19% de los iones y a 100 mm un 97.45%.

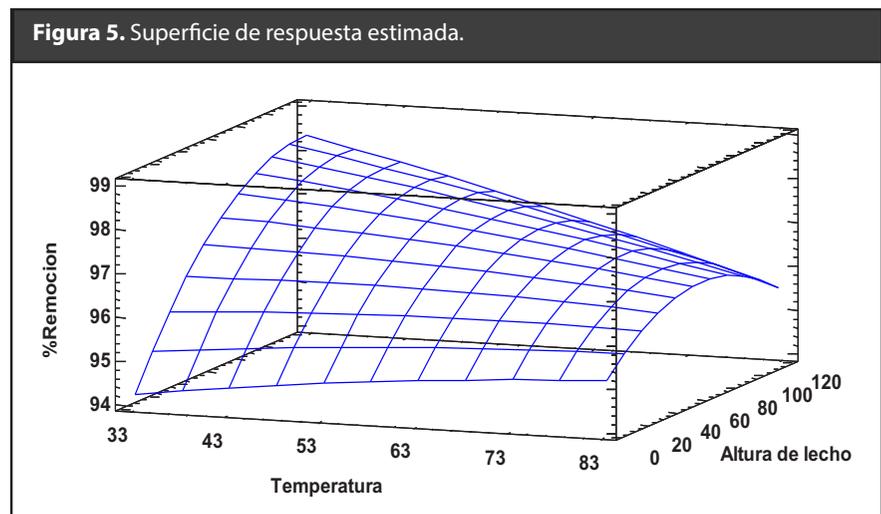


A pesar de tener un efecto ascendente positivo sobre la remoción, la altura de lecho no alcanza a tener una influencia determinante en el proceso de retención de los iones debido al grado de penetración que tienen los mismos dentro de la estructura de la torta residual de almidón de plátano y su alta velocidad de difusión intraparticular que favorece la retención inmediata de estos iones en la superficie, además, al aumentar la altura del lecho también se incrementa el área superficial del adsorbente, disponiéndose de más sitios de unión para la adsorción (Boucherdoud et al., 2021; C. N. Tejada-Tovar, Villabona-Ortíz, & Ortega-Toro, 2020).

La ecuación (6) del modelo ajustado a los datos reales de la adsorción de Ni (II), fue realizada con el análisis ejecutado por medio del software **STATGRAPHICS CENTURION XVI.II:**

$$\text{Remoción} = 93.0004 + 0.0434519 * T + 0.0920353 * A - 0.000212473 * T^2 - 0.000630952 * T * A - 0.000302289 * A^2 \quad (6)$$

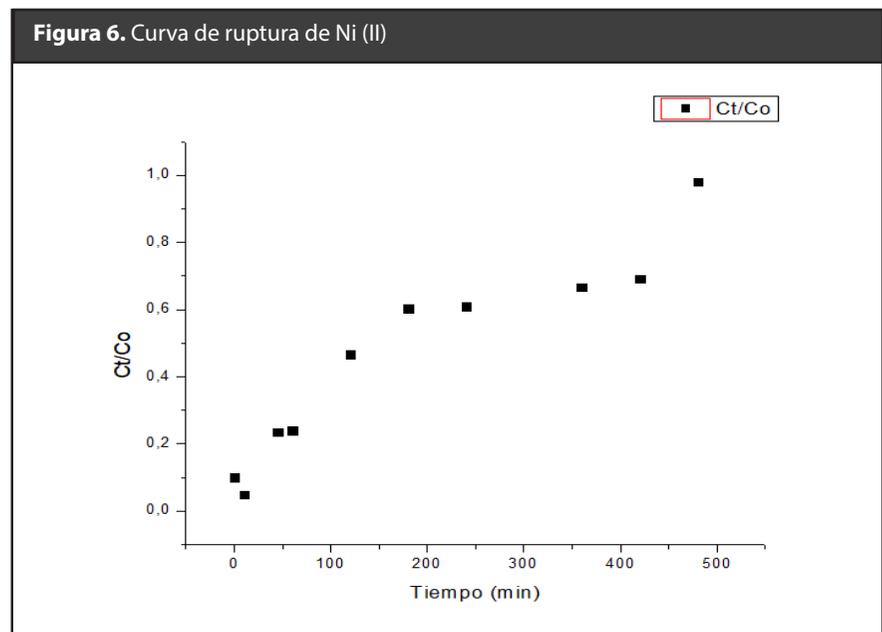
En donde cada variable contiene sus unidades originales (mm, °C) evaluadas con los valores de las predicciones que arrojan la gráfica de la función como una superficie estimada de la remoción de Ni (II), dada a continuación por la figura 5.



De los valores estimados en la superficie de respuesta para tener una alta eficiencia en la adsorción de los iones de Ni (II), el análisis nos indicó los valores óptimos para maximizar la remoción con el mínimo consumo de energía posible en la operación de la columna empacada, estableciendo una altura de lecho de 11.4 cm y una temperatura de 33 °C.

3.3. Curva de ruptura

Para establecer la vida útil y punto de saturación del lecho a través de la curva de avance se realizó el proceso durante un periodo de ocho horas continuas, para una concentración inicial de 100 ppm de Ni (II), con altura de lecho de 11.4 cm y temperatura 33°C. La grafica C_t/C_o vs Tiempo de operación para la adsorción de Ni (II) son mostrados en la figura 6.



La curva de avance realizada para la adsorción de Ni (II), corrobora como se da la adsorción en sistemas continuos, donde la mayor remoción del ion metálico se da en los primeros instantes de contacto con la biomasa adsorbente, además muestra un punto de quiebre cercano a las 3 horas de operación, mostrando una tendencia en la disminución de la capacidad de adsorción a medida que la solución continuó fluyendo, debido a la ocupación gradual de los sitios activos disponibles, alcanzando la saturación completa del adsorbente durante las ocho horas de operación continua (Abdolali et al., 2017).

Posteriormente para el cálculo de se calculó la capacidad de la columna en (mg/g) mediante la ecuación 7:

$$q_{etotal} = \frac{Q}{1000m} \int_0^T (C_o - C_t) dt \quad (7)$$

Donde Q es el caudal (ml/min), m la cantidad de adsorbente (g) y C_0 , C_t la concentración inicial y final del metal en solución (mg/L) (Gómez, Herrera, & Sánchez, 2019). De la resolución de la integral por métodos numéricos se encontró una capacidad total de 18.72 mg/g.

3.4. Ajuste de modelos

Para determinar la característica general del proceso, se evaluó la curva de ruptura con los modelos de Thomas, Dosis de Respuesta, Yoon-Nelson y Tiempo de servicio en el lecho, en la tabla 4 se muestran los parámetros calculados equivalentes para cada uno de los modelos estudiados. Para analizar los datos, se realizó el análisis de regresión no lineal para el ajuste de la curva de modelado de avance, debido a su versatilidad y su precisión para ecuaciones que contienen más de dos parámetros (Butler, Lall, & Bonnafeous, 2017). El modelo mejor ajustado en el sistema de adsorción de columna se eligió de acuerdo con el coeficiente de correlación determinado (R^2) (Sivarajasekar et al., 2018).

De las figuras y tablas presentadas se observa que el modelo de Thomas y Yoon-Nelson describen moderadamente los datos experimentales por un ajuste similar presentado de 0.8552 y 0.8558 respectivamente. El modelo de tiempo de servicio en el lecho no explicó suficientemente bien los datos de adsorción en lecho fijo como los de otros modelos, por un ajuste de 0.7232. Mientras que el modelo de dosis de respuesta describe la curva con mayor precisión puesto que fue el que mayor ajuste tuvo (0.9366) a la dinámica de adsorción presentada por el lecho.

Tabla 4. Parámetros calculados para Thomas

Modelo	R^2	Parámetros	Valor	Error estándar
Modelo Thomas	0.8552	K_{Th}	0.085	0.016
		Q_m	20.749	2.610
Modelo Dosis Respuesta	0.937	a	2.453	2.473
		Q_0	1.583	1.937
Modelo Yoon-Nelson	0.8558	τ	0.009	0.002
Modelo de BDST	0.723	K_{BDST}	0.749	---
		N_0	0.719	7.6410^{-6}
		v	0.750	$5.63 \cdot 10^{-6}$

3.5. Parámetros termodinámicos

Para la adsorción de Ni (II) los parámetros termodinámicos reflejaron la factibilidad y la naturaleza espontánea del proceso; así, el cambio de energía libre, el cambio de entalpía y el cambio de entropía de superficie fueron estimados usando el cambio de la constante de equilibrio con la temperatura absoluta.

Así para el cálculo de los parámetros termodinámicos, se tiene en cuenta que la energía libre de Gibbs permite establecer si un proceso es espontáneo o no, valores negativos de ΔG implican un proceso espontáneo, mientras que valores positivos significan

que es necesario aportar energía (Arshadi, Amiri & Mousavi, 2014). Esta se calcula a partir de las ecuaciones:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (8)$$

$$\Delta G = -RT * \ln k_c \quad (9)$$

Donde $K_c = \frac{C_{ac}}{C_{se}}$

C_{ac} es la concentración del adsorbato en el equilibrio contenido en la superficie del adsorbente, C_{se} es la concentración en solución en el equilibrio y R es la constante universal de los gases (8.314 J/mol.K). Mientras la entalpia de adsorción, aporta información acerca del carácter exotérmico o endotérmico del proceso, se puede también estimar la energía de activación y además permite diferenciar si se trata de un proceso que ocurre vía adsorción física (valores bajos) o química (valores altos). Si el valor de $\Delta H = 2.1-20.9$ kJ/mol se trata de adsorción física, y si $\Delta H = 80-200$ kJ/mol se trata de adsorción química (Ratan et al., 2016). Se obtiene a partir de:

$$\ln K_c = \frac{-\Delta H}{R * T} + \frac{\Delta S}{R} \quad (10)$$

Para calcular los parámetros termodinámicos, se utilizó el método grafico basado en la ecuación de Van't Hoff (Mahmood-Ul-Hassan et al., 2018). Se pudo determinar para el proceso de adsorción de Ni (II) con la torta residual de almidón de plátano que el proceso obedece a una naturaleza exotérmica, reversible y fiable termodinámicamente para llevar a cabo la adsorción, tal como lo evidencian los valores de los parámetros en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de parámetros termodinámicos de la adsorción de Ni (II)

T (K)	ΔG° (KJ/mol)	ΔH° (KJ/mol)	ΔS° (KJ/molK)
306.15	9.714	-8.826	-60.56
328.15	11.04	-	
349.15	21.45	-	

Los valores ΔG positivos a diferentes temperaturas demostraron la naturaleza no espontánea del proceso de adsorción. En general, el cambio ΔG para la fisisorción es menor que el de la quimisorción lo que implica un mecanismo dominado por una adsorción física en la eliminación de Ni (II). Adicionalmente el valor negativo ΔH es un indicativo directo de la exotermicidad presentada en el sistema, e indica que el tipo de adsorción presentada es de tipo físico (Šuránek et al., 2021). Además este ΔH puede justificar la alta remoción de Ni (II) a temperaturas ambiente y la baja incidencia en la adsorción del mismo cuando se presentan incrementos térmicos. El valor negativo

de ΔS° indica que a medida que se incremente la concentración de iones metálicos en solución, y cuando la temperatura aumente a cierto punto, la movilidad de los iones metálicos aumenta y hace que los iones salgan de la fase sólida a la fase líquida. Por lo tanto, la cantidad de metales que pueden ser adsorbidos disminuirá (Bibaj et al., 2019).

4. Conclusiones

Se estableció entonces el posible uso de la torta residual de almidón de plátano para la remoción de Ni (II) en un lecho fijo, siendo la presencia de los grupos funcionales hidroxilo y carboxilo los determinantes en la adsorción del metal. De los resultados, se concluye que ni la temperatura ni la altura de lecho tienen un efecto significativo sobre la adsorción del metal, estableciendo como condiciones óptimas una temperatura ambiente de 33°C y una altura de lecho de 11.4 cm, encontrando la saturación de la columna tras 8 horas de proceso. Se encontró además que es el modelo de Dosis-Respuesta al que mejor se ajustan los datos experimentales con un coeficiente de correlación de 0.937.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cartagena por el apoyo para desarrollar esta investigación, laboratorios, software y tiempo de los profesores investigadores y estudiantes. Asimismo, a Colciencias por su patrocinio a Érika Ruiz-Paternina a través del programa “Jóvenes Investigadores”.

Referencias bibliográficas

- Abbas, A.; Hussain, M. A.; Sher, M.; Irfan, M. I.; Tahir, M. N.; Tremel, W.; Hussain, S. Z.; & Hussain, I. (2017). Design, characterization and evaluation of hydroxyethylcellulose based novel regenerable supersorbent for heavy metal ions uptake and competitive adsorption. *International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.04.024>
- Abdolali, A.; Ngo, H. H.; Guo, W.; Zhou, J. L.; Zhang, J.; Liang, S.; Chang, S. W.; Nguyen, D. D.; & Liu, Y. (2017). Application of a breakthrough biosorbent for removing heavy metals from synthetic and real wastewaters in a lab-scale continuous fixed-bed column. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.016>
- Altino, H. O. N.; Costa, B. E. S.; & Da Cunha, R. N. (2017). Biosorption optimization of Ni(II) ions on Macauba (*Acrocomia aculeata*) oil extraction residue using fixed-bed column. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4895–4905. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.025>
- Azadi, F.; Saadat, S.; & Karimi-Jashni, A. (2018). Experimental Investigation and Modeling of Nickel Removal from Wastewater Using Modified Rice Husk in Continuous Reactor by Response Surface Methodology. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 42(3), 315–323. <https://doi.org/10.1007/s40996-017-0090-z>
- Azimi, A.; Azari, A.; Rezakazemi, M.; & Ansarpour, M. (2017). Removal of heavy metals from industrial wastewaters: A Review. *ChemBioEng Reviews*, 4(1), 37–59. <https://doi.org/10.1002/cben.201600010>
- Barquilha, C. E. R.; Cossich, E. S.; Tavares, C. R. G.; & Silva, E. A. (2017). Biosorption of nickel(II) and copper(II) ions in batch and fixed-bed columns by free and immobilized marine algae *Sargassum* sp. *Journal of Cleaner Production*, 150, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.199>
- Bibaj, E.; Lysigaki, K.; Nolan, J. W.; Seyedsalehi, M.; Deliyanni, E. A.; Mitropoulos, A. C.; & Ky-

- zas, G. Z. (2019). Activated carbons from banana peels for the removal of nickel ions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 667–680. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1676-0>
- Boucherdoud, A.; Kherroub, D. E.; Bestani, B.; Benderdouche, N.; Douinat, O.; & History, A. (2021). Fixed-bed adsorption dynamics of methylene blue from aqueous solution using alginate-activated carbon composites adsorbents ARTICLE INFO ABSTRACT/RESUME. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology Month Edition*, 0(0). www.aljest.org
- Butler, L.; Lall, U.; & Bonnafous, L. (2017). Cumulative heavy metal contamination in mining areas of the Rimac, Peru basin (pp. 1–27). http://water.columbia.edu/files/2018/01/13.2017.Butler.Draft_Cumulative-heavy-metal-contamination-in-mining-areas.pdf
- Chao, H. P.; Chang, C. C.; & Nieva, A. (2014). Biosorption of heavy metals on Citrus maxima peel, passion fruit shell, and sugarcane bagasse in a fixed-bed column. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), 3408–3414. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.12.027>
- Genchi, G.; Carocci, A.; Lauria, G.; Sinicropi, M. S.; & Catalano, A. (2020). Nickel: Human health and environmental toxicology. In *International Journal of Environmental Research and Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>
- Gómez, V. E.; Herrera, A. P.; & Sánchez, J. H. (2019). Removal of acetylsalicylic acid (Asa) in packed microcolumns with carbon xerogel modified with TiO₂ nanoparticles. *Ingeniería e Investigación*, 39(2), 11–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/ing.investig.v39n2.67604>
- Herrera-Barros, A.; Bitar-Castro, N.; Villabona-Ortíz, Á.; Tejada-Tovar, C.; & González-Delgado, Á. D. (2020). Nickel adsorption from aqueous solution using lemon peel biomass chemically modified with TiO₂ nanoparticles. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 17, 100299. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100299>
- Hokkanen, S.; Bhatnagar, A.; & Sillanpää, M. (2016). A review on modification methods to cellulose-based adsorbents to improve adsorption capacity. *Water Research*, 91, 156–173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.008>
- Jafari, S. A.; & Jamali, A. (2016). Continuous cadmium removal from aqueous solutions by seaweed in a packed-bed column under consecutive sorption-desorption cycles. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33(4), 1296–1304. <https://doi.org/10.1007/s11814-015-0261-1>
- Li, W.; Yan, J.; Yan, Z.; Song, Y.; Jiao, W.; Qi, G.; & Liu, Y. (2018). Adsorption of phenol by activated carbon in rotating packed bed: Experiment and modeling. *Applied Thermal Engineering*, 142, 760–766. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.051>
- Liao, B.; Sun, W. yi; Guo, N.; Ding, S. lan; & Su, S. jun. (2016). Equilibriums and kinetics studies for adsorption of Ni(II) ion on chitosan and its triethylenetetramine derivative. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 501, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.04.043>
- Mahmood-Ul-Hassan, M.; Yasin, M.; Yousra, M.; Ahmad, R.; & Sarwar, S. (2018). Kinetics, isotherms, and thermodynamic studies of lead, chromium, and cadmium bio-adsorption from aqueous solution onto Picea smithiana sawdust. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(13), 12570–12578. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1300-3>
- Maniglia, B. C.; & Tapia-bl, D. R. (2016). Food Hydrocolloids Isolation and characterization of starch from babassu mesocarp. 55, 47–55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.11.001>
- Martín-Lara, M. Á.; Trujillo Miranda, M. C.; Ronda, A.; Pérez Muñoz, A.; & Calero de Hocés, M. (2017). Valorization of olive stone as adsorbent of chromium(VI): comparison between laboratory- and pilot-scale fixed-bed columns. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(12), 2661–2674. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1345-8>
- Meneguín, J. G.; Moisés, M. P.; Karchiyappan, T.; Faria, S. H. B.; Gimenes, M. L.; de Barros, M. A. S. D.; & Venkatachalam, S. (2017). Preparation and characterization of calcium treated

- bentonite clay and its application for the removal of lead and cadmium ions: Adsorption and thermodynamic modeling. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.005>
- Mishra, A.; Dutt, B.; & Kumar, A. (2016). Packed-bed column biosorption of chromium (VI) and nickel (II) onto Fenton modified *Hydrilla verticillata* dried biomass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132, 420–428. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.026>
- Moino, B. P.; Costa, C. S. D.; da Silva, M. G. C.; & Vieira, M. G. A. (2017). Removal of nickel ions on residue of alginate extraction from *Sargassum filipendula* seaweed in packed bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(11), 2120–2128. <https://doi.org/10.1002/cjce.22859>
- Moscatello, N.; Swayambhu, G.; Jones, C. H.; Xu, J.; Dai, N.; & Pfeifer, B. A. (2018). Continuous removal of copper, magnesium, and nickel from industrial wastewater utilizing the natural product yersiniabactin immobilized within a packed-bed column. *Chemical Engineering Journal*, 343, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.093>
- Ratan, S.; Singh, I.; Sarkar, J.; & Rm, N. (2016). The Removal of Nickel from Waste Water by Modified Coconut Coir Pith. *Chemical Sciences Journal*, 7(3), 1–6. <https://doi.org/10.4172/2150-3494.1000136>
- Romero-Cano, L. A.; García-Rosero, H.; Gonzalez-Gutierrez, L. V.; Baldenegro-Pérez, L. A.; & Carrasco-Marín, F. (2017). Functionalized adsorbents prepared from fruit peels: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for copper adsorption in aqueous solution. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.032>
- Saadat, S.; Hekmatzadeh, A. A.; & Karimi Jashni, A. (2016). Mathematical modeling of the Ni(II) removal from aqueous solutions onto pre-treated rice husk in fixed-bed columns: a comparison. *Desalination and Water Treatment*, 57(36), 16907–16918. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1087877>
- Singh, S.; & Shukla, S. R. (2017). Theoretical studies on adsorption of Ni(II) from aqueous solution using Citrus limetta peels. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1002/ep.12526>
- Sivarajasekar, N.; Mohanraj, N.; Baskar, R.; & Sivamani, S. (2018). Fixed-Bed Adsorption of Ranitidine Hydrochloride Onto Microwave Assisted—Activated Aegle marmelos Correa Fruit Shell: Statistical Optimization and Breakthrough Modelling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(5), 2205–2215. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2565-4>
- Šoštarić, T. D.; Petrović, M. S.; Pastor, F. T.; Lončarević, D. R.; Petrović, J. T.; Milojković, J. V.; & Stojanović, M. D. (2018). Study of heavy metals biosorption on native and alkali-treated apricot shells and its application in wastewater treatment. *Journal of Molecular Liquids*, 259, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.055>
- Sreenivas, K. M.; Inarkar, M. B.; Gokhale, S. V.; & Lele, S. S. (2014). Re-utilization of ash gourd (*Benincasa hispida*) peel waste for chromium (VI) biosorption: Equilibrium and column studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 455–462. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.01.017>
- Šuránek, M.; Melichová, Z.; Kureková, V.; Kljajević, L.; & Nenadović, S. (2021). Removal of Nickel from Aqueous Solutions by Natural Bentonites from Slovakia. *Materials*, 14(2), 282. <https://doi.org/10.3390/ma14020282>
- Tejada-Tovar, C.; Gallo-Mercado, J.; Moscote, J.; Villabona-Ortíz, A.; & Acevedo-Correra, D.

- (2018). Competitive adsorption of lead and nickel on yam husk and palm bagasse in continuous system. *Revista Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(1), 52–61. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.624>
- Tejada-Tovar, C. N.; Villabona-Ortíz, A.; & Ortega-Toro, R. (2020). Cr(VI) biosorption: Effect of temperature, particle size and bed height. *Revista Facultad de Ingeniería*, 96, 78–86. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191149>
- Valencia, J. A. R.; González, J. P.; Jimenez-Pitre, I.; & Molina-Bolívar, G. (2019). Physico-chemical treatment of waste water contaminated with heavy metals in the industry of metallic coatings. *Journal of Water and Land Development*, 43(1), 171–176. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0075>
- Villabona-Ortíz, A.; Tejada-Tovar, C.; González-Delgado, Á. D.; Herrera-Barros, A.; & Cantillo-Arroyo, G. (2019). Immobilization of Lead and Nickel Ions from Polluted Yam Peels Biomass Using Cement-Based Solidification/Stabilization Technique. *International Journal of Chemical Engineering*, 2019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2019/5413960>