VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Estudio del Efecto de la Temperatura para la Remoción de Ni(II) sobre Residuo de Café en Sistemas Batch

Study of the Effect of Temperature on the Removal of Ni(II) Using Coffee Waste in Batch Systems

Miguel Ángel Ruiz Torres[1], Gladys Morales López[2], Sinaí Nieto Escoto[3], Luis Ángel Gil Galmich[3], Yareli Edith Lona Murieta[3].

[1]Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato. ma.ruiz@ugto.mx
[2] Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.
[3]Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato.

Resumen

En este estudio se evaluó la adsorción de Ni(II) en solución acuosa utilizando residuos de café como un material de bajo costo y origen agroindustrial. Se analizaron las isotermas de adsorción a 25 y 35 °C mediante los modelos de Langmuir y Freundlich, aplicando ajuste no lineal. Los resultados mostraron que los datos experimentales se ajustaron al modelo de Langmuir para la temperatura de 35 °C, lo que indica que el proceso de adsorción se lleva a cabo en monocapa sobre una superficie relativamente homogénea. La capacidad máxima de adsorción disminuyó con el aumento de temperatura de 65.76 a 46.63 mg/g, indicando una influencia significativa del efecto térmico en el equilibrio del sistema. Los parámetros del modelo de Freundlich ($n > 1$) confirmaron que la adsorción es favorable en todas las condiciones evaluadas. El análisis termodinámico basado en el modelo de Van't Hoff indicó que el proceso es endotérmico ($\Delta H° = 164.51$ kJ/mol), espontáneo ($\Delta G° < 0$) y acompañado de un incremento en la entropía ($\Delta S° = 0.606$ KJ/mol·K), lo que sugiere la participación de mecanismos de interacción química entre el Ni(II) y los grupos funcionales del adsorbente. En conjunto, los residuos de café se presentan como una propuesta eficiente, sostenible y de bajo costo para la remoción de Ni(II) en sistemas acuosos

Palabras clave: níquel; café; isoterma; adsorción.

Introducción

La contaminación de los recursos hídricos por metales pesados representa uno de los principales desafíos ambientales debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación en los organismos vivos. Entre estos contaminantes, el níquel (Ni(II)) es ampliamente utilizado en industrias como la galvanoplastia, la fabricación de baterías, la minería, la metalurgia y la producción de aleaciones, lo que genera efluentes con concentraciones significativas de este metal. La exposición prolongada al níquel puede ocasionar efectos adversos en la salud humana, incluyendo dermatitis, alteraciones respiratorias, daño renal y un mayor riesgo de desarrollar enfermedades carcinogénicas, (Arabian et al., 2020), (Ziarati et al., 2019). Por ello, la eliminación eficiente de Ni(II) de las aguas residuales constituye una prioridad tanto desde el punto de vista ambiental como sanitario. De acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, el límite para el níquel no debe exceder a 4 mg/L (Diario Oficial de la Federación, 2022).

Diversas tecnologías han sido empleadas para la remoción de metales pesados, entre ellas la precipitación química, el intercambio iónico, la filtración por membranas, la electrocoagulación y la extracción con solventes (Lewis, 2010), (Mungray, et al., 2012). Sin embargo, muchas de estas alternativas presentan limitaciones relacionadas con altos costos de operación, elevado consumo energético y generación de residuos secundarios. En este contexto, la adsorción ha surgido como una de las tecnologías más prometedoras debido a su alta eficiencia, simplicidad operativa y posibilidad de utilizar materiales adsorbentes de bajo costo.

En los últimos años, los materiales agroindustriales han despertado un creciente interés como biosorbentes para la eliminación de metales pesados. Estos residuos, entre los que se incluyen cáscaras de frutas, bagazo

de caña, cascarilla de arroz, residuos de té y café, poseen una estructura lignocelulósica rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que contienen grupos funcionales como hidroxilos, carboxilos, carbonilos y grupos fenólicos capaces de interactuar con especies metálicas mediante mecanismos de complejación, intercambio iónico, atracción electrostática y enlaces de hidrógeno. Además de su elevada disponibilidad y bajo costo, el aprovechamiento de estos residuos contribuye a la valorización de subproductos agroindustriales dentro del marco de la economía circular y el desarrollo sostenible (Amar, et al., 2020).

El desempeño de un adsorbente depende de diversos parámetros operacionales, entre los cuales la temperatura desempeña un papel determinante en el equilibrio y la cinética del proceso de adsorción. Las variaciones de temperatura pueden modificar la movilidad de los iones metálicos, la difusión hacia los sitios activos, la energía de interacción entre el adsorbato y el adsorbente y la distribución de las especies químicas en solución. En consecuencia, la temperatura influye directamente sobre parámetros fundamentales como la capacidad máxima de adsorción, las constantes de equilibrio y la naturaleza endotérmica o exotérmica del proceso. El análisis de este efecto, complementado con estudios de isotermas y parámetros termodinámicos, permite comprender los mecanismos de interacción y establecer las condiciones óptimas de operación para aplicaciones a escala industrial.

En este contexto, el presente estudio evalúa el efecto de la temperatura sobre la adsorción de Ni(II) empleando un material adsorbente derivado de residuos agroindustriales. Se analizan el equilibrio de adsorción mediante los modelos de Langmuir y Freundlich, así como la influencia de la temperatura sobre la capacidad de adsorción y la afinidad del sistema. Los resultados obtenidos contribuyen a ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de adsorbentes de origen agroindustrial en la remoción de metales pesados y proporcionan información relevante para el diseño de procesos sostenibles de tratamiento de aguas contaminadas con níquel.

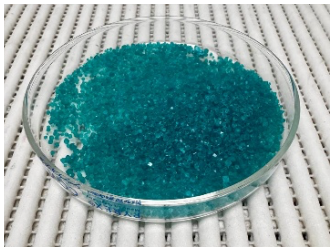
Metodología

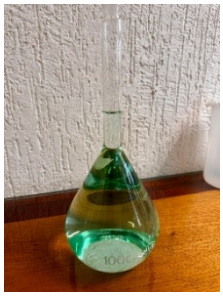
Preparación del material adsorbente

El material se obtuvo de la recolección de residuos de café de una casa habitación de la ciudad de Guanajuato. Este residuo se lavó con agua destilada para retirar impurezas y disminuir el color en el filtrado. Se dejó secar en un horno SHELAB Standard a 60°C durante 24 horas y posteriormente se hizo pasar a través de tamices de diferentes tamaños, hasta obtener un tamaño de partícula de 0.25 mm, que es el tamaño donde se obtiene la mayor capacidad de adsorción del ion metálico [19].

Preparación de la solución stock de Ni(II)

Se preparó una solución madre de concentración 1000 mg/L de Ni(II), disolviendo 4.96 g de nitrato de níquel(II) hexahidratado [$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$] en 1000 mL de agua destilada. Las soluciones de trabajo con diferentes concentraciones del elemento se obtuvieron mediante la dilución de la solución madre con agua destilada. Todos los reactivos utilizados fueron de calidad analítica (99.9% de pureza El pH de las soluciones se ajustó al valor requerido mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M y ácido clorhídrico (HCl) 0.1M (Figura 1).





VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Figura 1. Preparación de la solución madre de 1000 ppm de Ni(II) a partir de $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$.

Determinación de níquel por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA)

De una solución estándar de 1000 ppm de níquel se tomaron alícuotas en matraces aforados para obtener soluciones de concentración: 1, 5 y 8 ppm con la finalidad de obtener la curva de calibración. Se leyeron las muestras en un Espectrómetro de Absorción Atómica, modelo AAnalyst 200 Perkin Elmer a 341.48 nm, realizando las diluciones necesarias para que fuerza posible la lectura en la zona de la curva de calibración, (Figura 2). La concentración obtenida en cada muestra representa la cantidad de níquel que el material no logró adsorber.



Figura 2. Cuantificación de Ni(II) en las muestras por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

Experimentos de adsorción

Se realizaron experimentos de adsorción en sistemas batch. Se prepararon soluciones de Ni(II) a concentraciones de 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600 y 700 mg/L para las temperaturas de: 25 °C y 35 °C. Se colocaron 40 mL de solución de Ni(II) y 0.25 g de residuo de café, tamaño de partícula de 0.25 mm en tubos Corning. Los tubos se colocaron en una gradilla y enseguida fueron introducidos a un baño de agua a temperatura constante de 25 °C durante 5 días. El pH de las soluciones se ajustó cada 24 horas para mantenerlo constante de 4 (Rubio-Campos et al., 2025), empleando un medidor digital marca Yinmik modelo BLE-C600. Transcurrido el tiempo establecido para el estudio, se calculó la cantidad de ion metálico adsorbido. Se repitió el mismo procedimiento descrito anteriormente para la temperatura de 35 °C (Figura 3).

La capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) se calculó de acuerdo con la ecuación (1):

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (1)$$

donde C_0 es la concentración inicial de soluto en solución; C_e es la concentración del soluto en el equilibrio (mg/L); V es el volumen de la solución en contacto con el adsorbente (L); m es masa de adsorbente (g). Los modelos de isotermas de adsorción seleccionados para interpretar el proceso fisicoquímico fueron Langmuir y Freundlich.



Figura 3. Isotermas de adsorción de Ni(II) sobre residuo de café y ajuste de pH.

En la Tabla 1 se presentan las ecuaciones que los representan (ecuaciones 2 y 3). Los datos experimentales se ajustaron a los modelos matemáticos mediante regresión no-lineal, minimizando la suma de los errores al cuadrado (SSE, por sus siglas en inglés) mediante algoritmos introducidos en MATLAB R2026a.

Tabla 1. *Modelos de isotermas de adsorción.*

Modelo	Ecuación		Notación	Referencias
Langmuir	$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1+K_L C_e}$	(2)	K_L: Entalpía de adsorción (L/mg) q_e: Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g) q_{max}: Capacidad máxima de adsorción (mg/g) C_e: Concentración en el equilibrio (mg(L)	(Wahid, et al., 2022)
Freundlich	$q_e = K_F C^{1/n}$	(3)	K_F: Capacidad de adsorción n: Intensidad de adsorción	(Bayuo, et al., 2021)

Resultados

Isotermas de adsorción

Los datos experimentales obtenidos para las temperaturas de 25 °C y 35 °C fueron tratados mediante ajuste no lineal a los modelos de Langmuir y Freundlich utilizando algoritmos en MATLAB R2026a. Los gráficos se presentan en las Figuras 4 y 5. Como se puede observar en la Figura 3, los datos experimentales se ajustan al modelo de Langmuir con un factor de correlación R^2 igual a 0.8568 a la temperatura de 25 °C. Para el caso de 35 °C, los datos también se ajustan al modelo de Langmuir, alcanzando el equilibrio desde concentraciones bajas y obteniéndole un factor de correlación de 0.9627.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

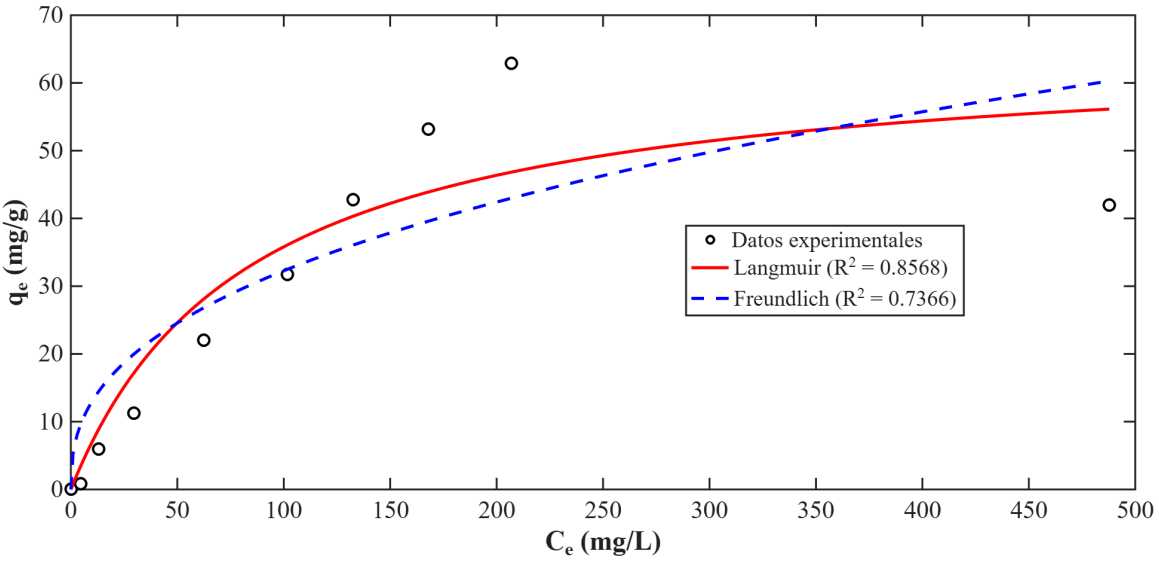


Figura 4. Isoterma de adsorción de Ni(II) sobre residuo de café, tamaño de partícula 0.25 mm, pH 4, temperatura 25°C.

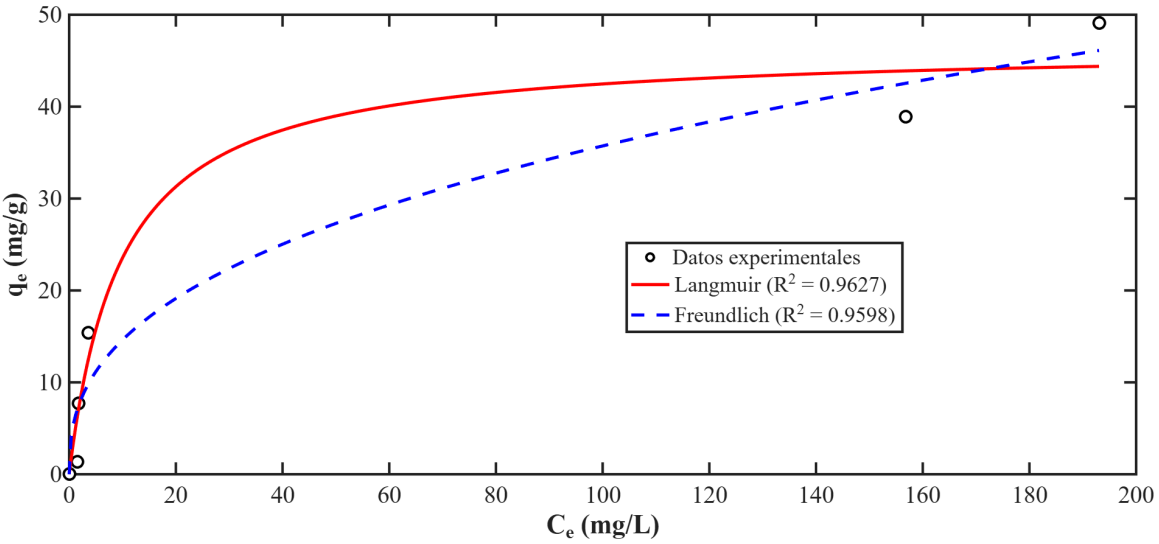


Figura 5. Isoterma de adsorción de Ni(II) sobre residuo de café, tamaño de partícula 0.25 mm, pH 4, temperatura 35 °C.

A partir de los modelos estudiados, se determinaron sus respectivos parámetros, así como los coeficientes de determinación y SSE, para las distintas temperaturas, estos datos se encuentran reportados en la Tabla 2. Como se puede apreciar en la Tabla 2, los resultados muestran que ambos modelos presentan un mejor ajuste a los datos experimentales a 35 °C, como lo evidencian los mayores valores de R^2 y los menores valores de SSE. Sin embargo, el modelo de Langmuir ofrece el mejor desempeño en ambas temperaturas principalmente a 35 °C, lo que sugiere que la adsorción ocurre predominantemente como una monocapa sobre una superficie relativamente homogénea. Aunque la constante K_L de Langmuir y la constante K_F de Freundlich aumentan con la temperatura, indicando una mayor afinidad entre el adsorbato y el adsorbente, la capacidad máxima de adsorción (q_{max}) disminuye de 65.76 a 46.63 mg/g, lo que sugiere que la temperatura incrementa la energía de interacción entre el adsorbato y los sitios activos más favorables (aumento de K_L), pero reduce el número total de sitios ocupados en equilibrio (disminución de q_{max}). Este comportamiento es frecuente en adsorbentes lignocelulósicos, biocarbones y materiales carbonosos, donde el calentamiento puede modificar la hidratación superficial y favorecer la desorción de especies unidas débilmente.

Por otra parte, los valores del parámetro n de Freundlich (2.54–2.58) permanecen por encima de la unidad, indicando que la adsorción es favorable en ambas temperaturas y que la heterogeneidad de la superficie no cambia significativamente.

Tabla 2. *Parámetros de los modelos de Langmuir y Freundlich para la adsorción de Ni(II) sobre residuo de café.*

Modelo	Parámetros	Temperatura (°C)	
		25	35
Langmuir	q_{max} (mg/g)	65.7606	46.63
	K_L (L/mg)	0.0118	0.1019
	R^2	0.8567	0.9626
	SSE	8.1148	3.6268
Freundlich	n	2.5365	2.5764
	K_F	5.2516	5.9798
	R^2	0.7365	0.9597
	SSE	11.0049	3.7659

Termodinámica de la adsorción de Ni(II) sobre residuo de café

La temperatura es un factor importante que influye en el proceso de adsorción. Este efecto puede explicarse mediante la evaluación de los parámetros termodinámicos. Dichos parámetros incluyen el cambio de energía libre de Gibbs estándar (ΔG°), el cambio de entalpía estándar (ΔH°) y el cambio de entropía estándar (ΔS°), los cuales se calculan mediante las siguientes ecuaciones (Al-Qadri, et al., 2024):

$$\Delta G^0 = -RT\ln K_C \quad (4)$$

$$\log K_C = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (5)$$

donde R es la constante universal de los gases ($8.314x10^{-3}$ KJ/mol K), T la temperatura en Kelvin y K_C denota el coeficiente de distribución de adsorción lineal. El cambio de entalpía fue calculado de la pendiente de la línea recta obtenida al graficar K_C vs 1/T (Figura 6), obtenida en función de la ecuación de Van´t Hoff en su forma lineal, así como el cambio de entropía. Posteriormente, se calculó ΔGº. Los parámetros termodinámicos se presentan en la Tabla 3.

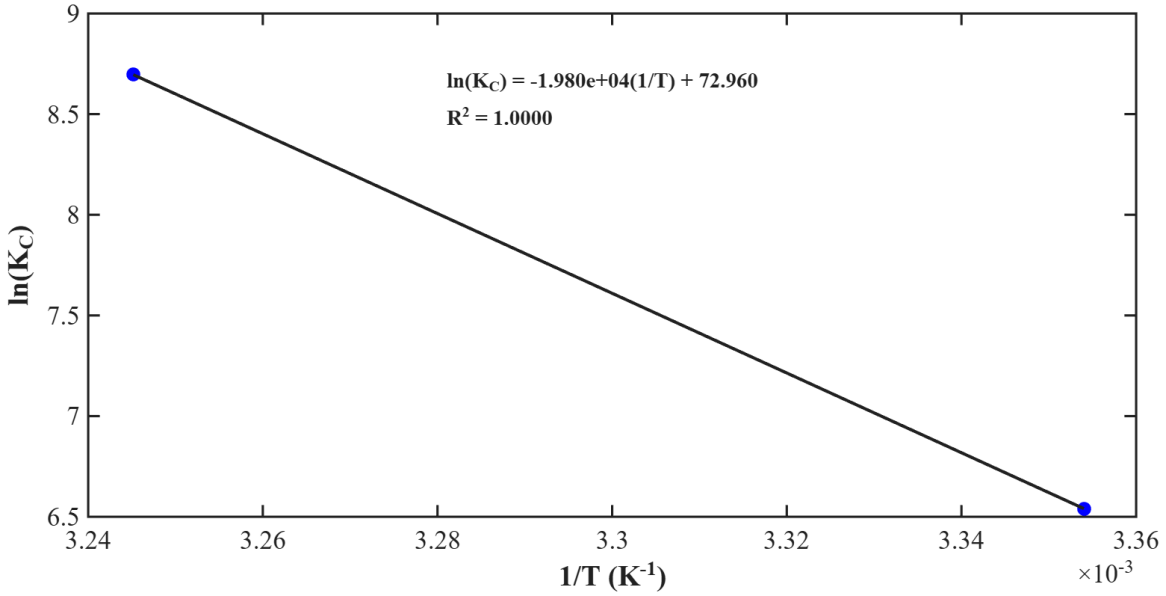


Figura 6. Gráfico de la ecuación de Van´t Hoff para Ni(II).

***Tabla 3**. Parámetros termodinámicos calculados para la adsorción de Ni(II) sobre residuo de café.*

T°(K)	ΔG(KJ/mol)	ΔH°(KJ/mol)	ΔS°(KJ/mol K)
25	-16.20	164.51	0.606
35	-22.27		

Como se puede observar en la Tabla 3, los resultados obtenidos indican un valor positivo de entalpía, lo que sugiere que el proceso de adsorción de Ni(II) es de naturaleza endotérmica. Este comportamiento implica que el incremento de temperatura favorece la interacción entre el ion metálico y los sitios activos del adsorbente, debido a un aumento en la movilidad de las especies en solución y a la activación de los sitios superficiales. Este tipo de comportamiento es característico de procesos donde la adsorción involucra interacciones químicas más que simples fuerzas físicas débiles.

Por otro lado, el valor positivo de entropía refleja un aumento en el grado de desorden del sistema en la interfase sólido–líquido durante el proceso de adsorción. Este incremento de entropía puede atribuirse a la liberación de moléculas de agua previamente hidratadas alrededor del ion Ni(II) y de los grupos funcionales superficiales del adsorbente, lo que genera un incremento en la aleatoriedad del sistema. Asimismo, este resultado sugiere la posible reorganización de las especies en la superficie del material, lo cual es consistente con mecanismos de adsorción complejos que involucran tanto interacciones físicas como químicas.

El análisis de la energía libre de Gibbs mostró valores negativos en el intervalo de temperaturas evaluado, lo que confirma que el proceso de adsorción de Ni(II) es espontáneo. Además, se observó una tendencia a valores más negativos de ΔG al aumentar la temperatura, lo que indica que la espontaneidad del proceso se incrementa con la temperatura.

Conclusiones

El estudio de la adsorción de Ni(II) sobre residuos de café demostró que este material agroindustrial presenta un desempeño eficiente como biosorbente, con un comportamiento fuertemente dependiente de la temperatura. El análisis de las isotermas de adsorción indicó que el modelo de Langmuir describe mejor el

equilibrio del sistema en comparación con el modelo de Freundlich, especialmente a 35 °C, este resultado sugiere que la adsorción ocurre predominantemente en forma de monocapa sobre una superficie relativamente homogénea, con una distribución de sitios activos energéticamente similar.

Los parámetros obtenidos evidencian que el aumento de la temperatura mejora significativamente la afinidad del sistema adsorbente–adsorbato, como lo indican los incrementos en las constantes de equilibrio (K_L y K_F). La capacidad máxima de adsorción disminuyó al aumentar la temperatura, indicativo de un proceso con características exotérmica, donde el incremento térmico favorece la desorción de Ni(II) desde la superficie del adsorbente. El parámetro de Freundlich confirma que la adsorción de Ni(II) sobre residuos de café es un proceso favorable, manteniendo una heterogeneidad superficial relativamente constante en el intervalo de temperatura estudiado. En conjunto, ambos modelos evidencian que la temperatura influye de manera significativa en la interacción adsorbente–adsorbato, mejorando el ajuste del modelo a condiciones térmicas más elevadas.

El análisis termodinámico mediante el modelo de Van't Hoff permitió determinar que el proceso de adsorción es endotérmico, espontáneo y termodinámicamente favorable.

En conjunto, los resultados indican que los residuos de café constituyen un material eficiente, económico y sostenible para la remoción de Ni(II) en soluciones acuosas, con un comportamiento dominado por mecanismos de adsorción de tipo químico y fuertemente influenciados por la temperatura del sistema.

Bibliografía/Referencias

Al-Qadri FA, Alsaiari R, Mohamed MM, Mohamed E, Alkorbi F, Alsaiari N, Rizk MA. (2024). Bio-Sorbent of Silica Ash from Palm Frond for limination Chromium (VI) from W ater Sources. Indian Journal of Science and Technology 17(11), 979-989. https://doi.org/10.17485/IJST/v17i11.3275

Amar, M.B., Walha, K. & Salvadó, V. (2020). Evaluation of Olive Stones for Cd(II), Cu(II), Pb(II) and Cr(VI) Biosorption from Aqueous Solution: Equilibrium and Kinetics. Int J Environ Res 14, 193–204. https://doi.org/10.1007/s41742-020-00246-5

Arabian S, Ziarati P, Sawicka B. (2020). Waste Herbal and Black Tea as a Novel Adsorbent for Detoxification of Pharmaceutical Effluent, J Med Discov 5(3),. https://doi.org/10.24262/jmd.5.3.20040

Bayuo, J. Decontamination of cadmium(II) from synthetic wastewater onto shea fruit shell. (2021). App Water Sci, 11(5):1–8. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01416-2

Diario Oficial de la Federación. (2022, 11 de marzo). NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022

Lewis, A.E.: Review of metal sulphide precipitation. (2010). Hydrometallurgy 104, 222–234 https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.06.010

Mungray, A,, Kulkarni, S. and Mungray, A. (2012). Removal of heavy metals from wastewater using micellar enhanced ultrafiltration technique: a review *Open Chemistry*, 10, 27-46. https://doi.org/10.2478/s11532-011-0134-3

Rubio Campos, N. Y., Hernández Cervantes, I. V., Castro Becerra, I. P., Nieto Escoto, S., Molina Barrientos, E. A., & Nieto Escoto, J. G. (2025). Estudio de las variables de operación para la remoción de níquel de soluciones acuosas en sistemas por lote. Jóvenes en la Ciencia, 37, 1–9. https://doi.org/10.15174/jc.2025.5038

Wahid SN, Maharaj R, Boodlal D, Smith JV. (2022). The adsorption of phenol on granular activated carbon prepared from waste coconut shell in Trinidad. Environ Prog Sustain Energy, 41(1):1–30. https://doi.org/10.1002/ep.13729

Ziarati P., Mirmohammad Makki F.S., Vambol S., Vambol, V. (2019). Determination of Toxic Metals Content in Iranian and Italian Flavoured Olive Oil. Acta Technologica Agriculturae Journal 22(2), https://doi.org/10.2478/ata-2019-0012