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

Adsorción competitiva de Cr(VI) y Ni(II) de Soluciones Acuosas sobre Posos de café

COMPETITIVE ADSORPTION OF Cr(VI) AND Ni(II) FROM AQUEOUS SOLUTIONS USING SPENT COFFEE GROUNDS

Beatriz Eugenia Rubio Campos[1]*, Iris Violeta Hernández Cervantes[2], Rebeca Jasmín Pérez Rodríguez[2], Tare Ariel Novelo Esquivel[2], Paolo Bernardo Nicolás Carrillo Castro[2], Katia Guadalupe Lira Flores[1], Ana Yadira Saldaña Camacho[1]
[1]Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato, be.rubiocampos@ugto.mx
[2]División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

Resumen

En este estudio se evaluó la adsorción competitiva de iones metálicos Cr(VI) y Ni(II) sobre posos de café, analizando el efecto del pH, la concentración inicial y la temperatura, así como el ajuste a diferentes modelos de isotermas. Los resultados mostraron una fuerte dependencia del pH en ambos metales, observándose que la remoción de Ni(II) se favorece en condiciones de pH neutras a alcalinas, alcanzando eficiencias superiores al 90 %, mientras que Cr(VI) presenta una máxima adsorción en medio altamente ácido (pH 2), con eficiencias cercanas al 98 %, atribuido a la especiación del cromo y a interacciones electrostáticas con la superficie del adsorbente. El incremento de la concentración inicial favoreció ligeramente la remoción de ambos iones, destacando la alta afinidad del sistema por Ni(II), con eficiencias superiores al 94 %, mientras que Cr(VI) mostró un aumento moderado en su retención. El análisis de isotermas indicó que el modelo de Langmuir describe adecuadamente el proceso de adsorción para ambos metales, sugiriendo la formación de una monocapa sobre una superficie con sitios homogéneos. Asimismo, los parámetros obtenidos confirmaron una mayor afinidad del adsorbente por Cr(VI) cuando la temperatura se incrementó, lo que sugiere un proceso endotérmico. Los resultados demuestran que el adsorbente presenta un alto potencial para la remoción eficiente de Cr(VI) y Ni(II) en sistemas acuosos, con comportamiento dependiente de las condiciones fisicoquímicas del medio.

Palabras clave: posos de café; adsorción; isoterma; níquel (II); cromo (VI).

Introducción

El níquel en su estado de oxidación +2 Ni(II) y el cromo hexavalente (Cr(VI)) son considerados metales pesados de alta relevancia ambiental debido a su toxicidad, movilidad y persistencia en sistemas acuáticos. Su presencia en el agua se asocia principalmente con descargas de efluentes industriales provenientes de la galvanoplastia, la minería, la industria metalúrgica, la fabricación de acero inoxidable, el curtido de pieles y la producción de pigmentos. En particular, el Cr(VI) se distingue por su alta solubilidad, fuerte capacidad oxidante y carácter carcinogénico, mientras que el Ni(II), aunque puede participar en procesos biológicos en bajas concentraciones, resulta tóxico para humanos y organismos acuáticos cuando excede los límites permisibles, generando efectos adversos en sistemas respiratorio, renal y dérmico (World Health Organization [WHO], 2022).

La contaminación de cuerpos de agua por estos metales ha impulsado el desarrollo de diversas tecnologías para su remoción, entre las que destacan la precipitación química, el intercambio iónico, la filtración por membranas, la electrocoagulación y la adsorción. Entre estos métodos, la adsorción ha cobrado especial importancia debido a su eficiencia, simplicidad operativa y capacidad de tratamiento a bajas concentraciones de contaminantes. En el caso del Cr(VI), además, se ha demostrado que su eliminación es más efectiva cuando se incluye una etapa de reducción a Cr(III), especie menos tóxica y soluble, lo que facilita su posterior precipitación o retención en materiales adsorbentes (Yu *et al.*, 2024).

Los adsorbentes de origen natural y los materiales derivados de residuos biomásicos han emergido como una estrategia prometedora para la remoción de Ni(II) y Cr(VI). Materiales como el biochar, la celulosa

modificada, la lignina, el quitosano y diversos residuos agrícolas tratados presentan alta disponibilidad, bajo costo y una elevada densidad de grupos funcionales (hidroxilos, carboxilos y aminas) capaces de interactuar con los iones metálicos mediante complejación, intercambio iónico y procesos redox (Rajasulochana, *et al*., 2016). En el caso del Cr(VI), muchos de estos materiales también pueden actuar como agentes reductores, transformándolo a Cr(III), una forma menos tóxica y más fácil de precipitar y remover del agua (Fu & Wang, 2011; Sharma & Bhattacharya, 2016).

En particular los posos de café (PDC) han demostrado alcanzar altas eficientes para remover metales pesados (Rubio-Campos *et al*., 2025). Asimismo, la valorización de residuos de café como adsorbentes se enmarca en los principios de economía circular, al transformar un desecho orgánico en un material funcional para la remediación ambiental. Investigaciones recientes han confirmado que estos materiales pueden ser optimizados mediante procesos de activación física o química, incrementando su área superficial y su capacidad de adsorción para metales pesados en aguas residuales industriales.

En este contexto, el objetivo de esta investigación es estudiar la factibilidad del uso de (PDC) como adsorbente para la eliminación simultánea de iones Cr(VI) y Ni(II) de soluciones acuosas.

Materiales y métodos

Preparación del material adsorbente

El material se recolectó del café usado 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 (Rubio-Campos *et al*., 2024).

Soluciones stock de iones metálicos

Se preparó una solución madre de concentración 1000 mg/L de Cr(VI), disolviendo 2.8 g de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 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. Los reactivos utilizados fueron de calidad analítica (99.9% de pureza).

Se pesaron 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.

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) 0.1 M.

Experimentos de adsorción

Efecto del pH y de la concentración inicial de iones metálicos

Se llevaron a cabo experimentos por lotes para investigar las propiedades de adsorción de los PDC en la remoción de Cr(VI) y Ni(II), como función del pH y concentración inicial de los iones metálicos.

Para el efecto del pH, se colocaron 0.25 g del material en un vaso de precipitados de 100 mL y se pusieron en contacto con 20 mL de solución de Cr(VI) 100 ppm y 20 mL de solución de Ni(II) 100 ppm, (para ambas soluciones el pH se ajustó al inicio de la prueba, equivalente a 2). La mezcla se mantuvo en agitación utilizando un agitador magnético CORNING PC-420D a 280 rpm durante 24 horas y temperatura ambiente. Simultáneamente se preparó una solución acuosa control con el mismo volumen y concentración inicial de los iones metálicos, pero sin adsorbente, bajo las mismas condiciones. Se repitió el mismo proceso para los valores de pH: 4, 6, 8, 10 y 12. Una vez concluido el tiempo, las muestras se filtraron empleando papel filtro Whatman de 125 mm y el sobrenadante se utilizó para determinar el contenido de Cr(VI) y Ni(II) mediante el método colorimétrico de la 1,5-difenilcarbazida (NMX-AA-044-SCFI-2014) y Espectrometría de Absorción Atómica (EAA), respectivamente (Rubio-Campos, 2025).

Para el experimento del efecto de la concentración inicial de los iones metálicos, se colocaron 0.25 g de PDC en un vaso de precipitados de 100 mL y se pusieron en contacto con 20 mL de solución de Cr(VI) 50 ppm y 20 mL de solución de Ni(II) 50 ppm (manteniendo constante el pH de ambas soluciones y temperatura ambiente). La mezcla se mantuvo en agitación utilizando un agitador magnético CORNING PC-420D a 280 rpm durante 24 horas. Simultáneamente se preparó una solución acuosa control con el mismo volumen y concentración inicial de los iones metálicos, pero sin adsorbente, bajo las mismas condiciones. Se repitió el mismo proceso para la concentración de iones metálicos de 100 ppm. Una vez concluido el tiempo, las muestras se filtraron empleando papel filtro Whatman de 125 mm y el sobrenadante se utilizó para su posterior cuantificación del contenido de Cr(VI) y Ni(II) mediante el método colorimétrico de la 1,5-difenilcarbazida (NMX-AA-044-SCFI-2014) y EAA (Rubio-Campos), respectivamente.

El porcentaje de eficiencia de adsorción se calculó de acuerdo con la ecuación (1):

$$\% \text{ eficiencia adsorción} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

donde C_0 es la concentración inicial de soluto en solución y C_e es la concentración del soluto en el equilibrio (mg/L).

Isotermas de adsorción

Se prepararon soluciones de Cr(VI) y Ni(II) a las concentraciones de 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600 y 700 mg/L para dos temperaturas de trabajo (25°C y 35°C). Se colocaron 20 mL de solución de Cr(VI), 20 mL de solución de Ni(II) y 0.25 g de PDC, 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 controlada de 25°C durante 5 días. El pH de las soluciones se ajustó cada 24 horas para mantenerlo constante. Transcurrido el tiempo establecido para el estudio, se calculó la cantidad de ion metálico adsorbido. Los modelos de isotermas de adsorción utilizados para interpretar el proceso fisicoquímico fueron Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin-Radushkevich, ecuaciones (2) - (5), respectivamente; (Wahid *et al*., 2022), (Bayuo, 2021), (Alam *et al*., 2018). 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.

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

$$q_e = K_F C^{1/n} \quad (3)$$

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln A_T C_e \quad (4)$$

$$q_e = q_m \exp\left(-B\varepsilon^2\right) \quad (5)$$

donde q_e es la capacidad de adsorción en el equilibrio, q_{max} la capacidad máxima de adsorción, C_e la concentración en el equilibrio, K_L es la constante de Langmuir, K_F la constante de Freundlich, n la intensidad de adsorción, R: Constante de los gases ideales, T: Temperatura absoluta, b y A_T: Constantes de Temkin, q_m la capacidad máxima de adsorción teórica, B: Coeficiente asociado a la energía de adsorción y ε el potencial Polanyi.

La capacidad de adsorción de Cr(VI) en equilibrio (q_e) se calculó utilizando la ecuación (6):

$$q = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (6)$$

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).

Resultados

Efecto del pH

En la Figura 1, se presenta el porcentaje de adsorción de iones metálicos como una función del pH. Como puede observase en la Figura 1, la remoción de Ni(II) presenta una fuerte dependencia del pH. A pH 2 se obtiene la menor eficiencia (41.47%), lo que indica que el medio altamente ácido desfavorece la adsorción del níquel. En estas condiciones, la elevada concentración de protones (H^+) compite con los iones Ni^{2+} por los sitios activos del adsorbente, reduciendo significativamente la adsorción. Conforme se incrementa el pH hasta llegar a 4, la eficiencia de remoción considerablemente (94.59%) y permanece por encima del 90 % entre pH 4 y 12. Esto sugiere que el adsorbente posee una alta afinidad por el Ni^{2+} en condiciones ligeramente ácidas, neutras y alcalinas, debido a la disminución de la competencia con los protones y a la mayor disponibilidad de sitios de adsorción con carga negativa.

El comportamiento para los iones Cr(VI) es diferente. La máxima adsorción se observa a pH 2 (98.32 %), lo que indica que el proceso de adsorción es favorecido en condiciones fuertemente ácidas. A medida que aumenta el pH, la eficiencia disminuye gradualmente hasta alcanzar un mínimo de 63.08 % a pH 8. Posteriormente, la remoción vuelve a incrementarse, alcanzando 86.66 % a pH 12.

Este comportamiento puede atribuirse a cambios en la especiación química del cromo y en la carga superficial del adsorbente. En soluciones ácidas predominan especies aniónicas de Cr(VI), como $HCrO_4^-$, que son favorecidas por una superficie del adsorbente protonada y con carga positiva. A valores más altos de pH, la superficie se desprotona y adquiere carga negativa, generando repulsión electrostática con especies como CrO_4^{2-} y disminuyendo la adsorción (Marinho, *et al*., 2019). El incremento observado a pH 12 podría estar asociado con mecanismos adicionales, como la formación de complejos superficiales o cambios en la composición de las especies presentes en solución. Otros investigadores han reportado resultados similares para la adsorción de Ni(II) y Cr(VI) mediante otros adsorbentes (Sheikhi *et al*., 2023).

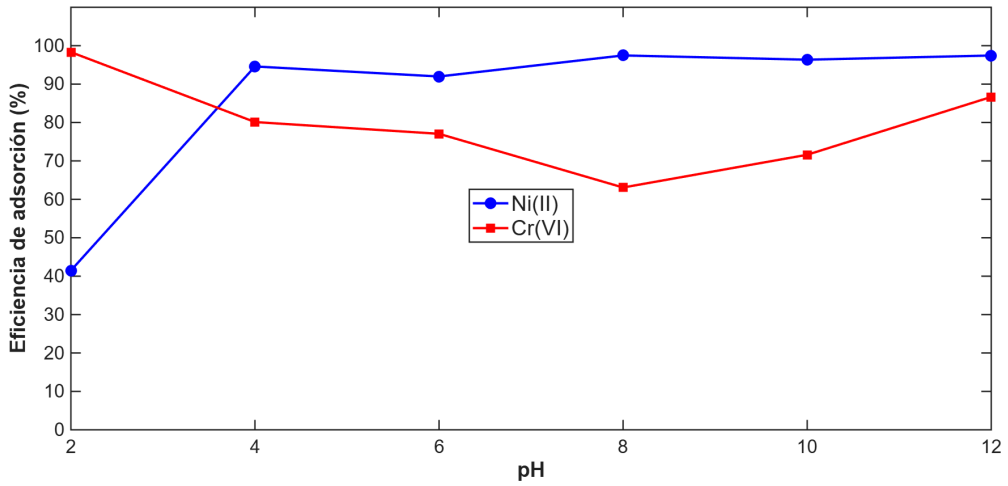


Figura 1. Efecto del pH sobre la adsorción competitiva de Cr(VI) y NI(II) sobre PDC (Concentración inicial de adsorbatos 100 ppm, tamaño de partícula 0.25 mm, tiempo de contacto 24 horas, temperatura ambiente y agitación 280 rpm).

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Efecto de la concentración inicial de iones metálicos

En la Figura 2, se presenta el gráfico correspondiente a la eficiencia de adsorción como función de la concentración inicial de los iones metálicos, a temperatura y constantes. Para Cr(VI), la eficiencia aumenta de 75.3% a 87.25% cuando la concentración se incrementa de 50 a 100 ppm, lo que indica una mejora notable *n su retención y sugiere que el sistema aún no ha alcanzado la saturación. Sin embargo, su adsorción es relativamente menor en comparación con el Ni(II) lo que puede atribuirse a la naturaleza aniónica del Cr(VI) y a su menor afinidad por los sitios activos disponibles a este pH.

En el caso del Ni(II), la eficiencia es consistentemente alta, pasando de 94.1% a 96.95%, lo que refleja una fuerte afinidad del sistema hacia este catión. Además, el incremento es pequeño, lo que sugiere que el sistema se encuentra cerca de su capacidad máxima de adsorción para este ion.

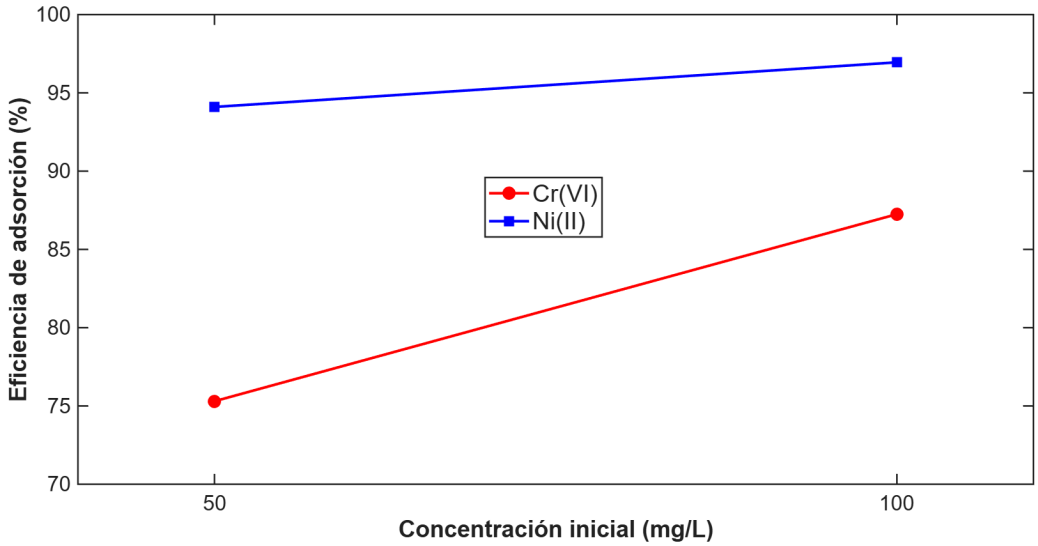


Figura 2. Efecto de la concentración inicial de Cr(VI) y NI(II) sobre PDC (pH 5, tamaño de partícula 0.25 mm, tiempo de contacto 24 horas, temperatura ambiente y agitación 280 rpm).

Isotermas de adsorción

En las Figuras 3a) y 3b) se presentan los gráficos correspondientes a las isotermas de adsorción para Cr(VI) y Ni(II), respectivamente para la temperatura de 25 °C. Como se puede observar para ambos iones metálicos, los datos experimentales se ajustan al modelo de Langmuir, lo que sugiere que la adsorción ocurre mediante la formación de una monocapa sobre una superficie con sitios de adsorción relativamente homogéneos. Sin embargo, para el Cr(VI) el factor de determinación es mayor que para el Ni(II), esto indica la afinidad que posee el material adsorbente por el Cr(VI), que puede estar presente en alguna de sus especies aniónicas en condiciones ácidas.

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

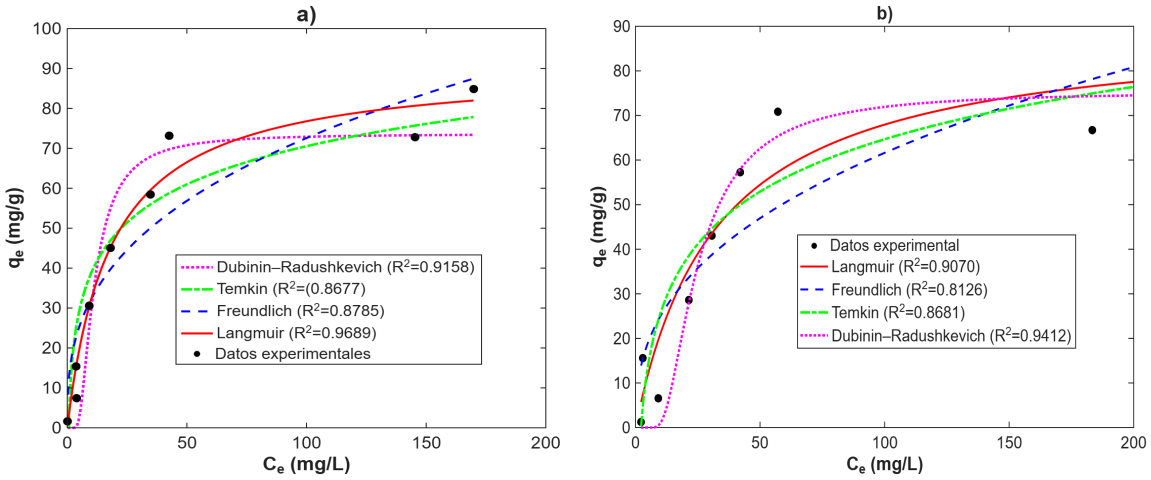


Figura 3. Isotermas de adsorción, a) Cr(VI) y b) Ni(II) sobre PDC (pH 5, tamaño de partícula 0.25 mm, temperatura 25 °C y agitación 280 rpm).

En las Figuras 4a) y 4b) se presentan las isotermas para los iones metálicos en estudio a la temperatura controlada de 35 °C. Los resultados indican que el modelo de Langmuir proporciona el mejor ajuste para la adsorción tanto de Cr(VI) como de Ni(II), lo que sugiere que el proceso de adsorción ocurre principalmente mediante la formación de una monocapa sobre una superficie con sitios de adsorción homogéneos. En este caso, los altos valores de R^2 obtenidos para Langmuir (0.9827) para Cr(VI) y (0.9470) para Ni(II)) respaldan que el adsorbente posee una distribución relativamente uniforme de sitios activos y que la adsorción está limitada por la disponibilidad de estos sitios. Además, el ajuste fue particularmente mejor para Cr(VI), lo que sugiere una mayor afinidad del material adsorbente por las especies aniónicas de Cr(VI).

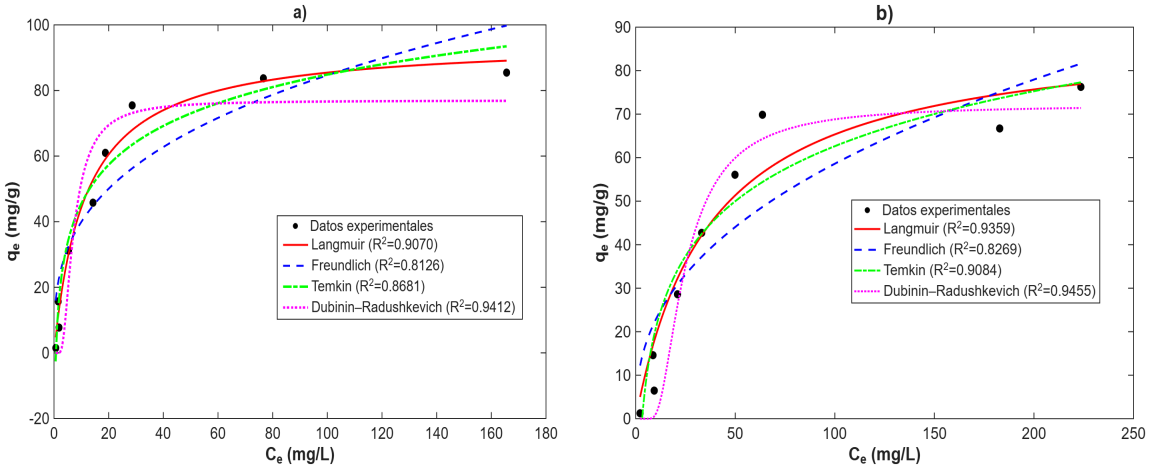


Figura 4. Isotermas de adsorción, a) Cr(VI) y b) Ni(II) sobre PDC (pH 5, tamaño de partícula 0.25 mm, temperatura 35 °C y agitación 280 rpm).

De los gráficos obtenidos, se determinaron los parámetros de los modelos de isotermas en estudio, los cuales se reportan en la Tabla 1.

Los datos experimentales se ajustaron al modelo de Langmuir para ambos contaminantes, con valores altos de coeficiente de determinación, para el Cr(VI) los valores oscilaron entre 0.9689–0.9790 y para el Ni(II) entre 0.9070–0.9352, con valores menores de SSE en comparación con los otros modelos. Esto sugiere que la adsorción ocurre predominantemente en una monocapa sobre una superficie homogénea, con un número finito de sitios activos. Además, las capacidades máximas de adsorción son elevadas, destacando Cr(VI) con

un incremento de 90.78 a 95.28 mg/g al aumentar la temperatura, lo que indica un proceso favorecido térmicamente y posiblemente de naturaleza endotérmica.

En el caso del Ni(II), los valores de q_m se mantienen relativamente estables (90.29 a 89.87 mg/g), lo que sugiere una menor sensibilidad a la temperatura en comparación con el cromo hexavalente. Los valores de K_L también aumentan ligeramente para Cr(VI) con la temperatura, lo que indica una mayor afinidad del adsorbente por este ion a temperaturas más altas.

Para el modelo de Freundlich los valores de n > 1 en todos los casos indican que la adsorción es favorable para ambos metales.

Por otro lado, el modelo de Temkin muestra un ajuste intermedio, con un mejor desempeño a 35 °C especialmente para Cr(VI) (R^2 = 0.9551), lo que sugiere que las interacciones adsorbato–adsorbente presentan cierta influencia de calor de adsorción variable. El modelo de Dubinin–Radushkevich (D–R) presenta coeficientes de determinación relativamente altos (0.89–0.95), principalmente para Ni(II) a 25 °C (0.9412) y 35 °C (0.9455), lo que sugiere que también puede existir contribución de mecanismos de adsorción en microporos.

***Tabla 1**. Parámetros de los modelos de Isotermas de Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin-Radushkevich para la adsorción competitiva de Cr(VI) y Ni(II) sobre PDC.*

Modelo	Parámetro	Cr(VI)		Ni(II)	
		25 °C	35 °C	25 °C	35 °C
Langmuir	q_m (mg/g)	90.78	95.276	90.29	89.866
	K_L	0.0548	0.0869	0.0304	0.0266
	R^2	0.9689	0.9790	0.9070	0.9352
	SSE	4.8919	4.49	8.43	6.53
Freundlich	K_F	14.330	18.829	10.1277	8.815
	N	2.840	3.067	2.551	2.433
	R^2	0.8785	0.8575	0.8126	0.8269
	SSE	9.6638	11.70	11.96	11.25
Temkin	A (L/mg)	1.659	1.4316	0.4539	0.3099
	b (J/mol)	179.53	144.94	146.17	140.37
	R^2	0.8677	0.9551	0.8681	0.9084
	SSE	10.09	6.57	10.04	7.76
Dubinin-Radushkevich	q_m (mg/g)	73.628	76.963	75.381	72.086
	B (mol^2/J^2)	1.639e-05	7.058e-05	7.736e-05	7.1710e-05
	R^2	0.9158	0.8973	0.9412	0.9455
	SSE	8.48	9.94	6.70	6.31

Conclusiones

El presente estudio demostró que el material adsorbente PDC presenta una alta eficiencia en la remoción competitiva de Cr(VI) y Ni(II) en solución acuosa, con un comportamiento fuertemente dependiente de las condiciones fisicoquímicas del medio.

El pH es el factor más determinante en el proceso de adsorción. La remoción de Ni(II) se ve severamente inhibida en medios altamente ácidos debido a la competencia con los protones, mientras que se favorece significativamente a pH neutro y alcalino, alcanzando eficiencias superiores al 90 %. En contraste, Cr(VI) presenta su mayor adsorción en condiciones fuertemente ácidas, lo cual se atribuye a la predominancia de especies aniónicas protonadas y a la interacción electrostática favorable con la superficie cargada positivamente del adsorbente.

El incremento de la concentración inicial de los iones metálicos no afectó negativamente la eficiencia del sistema, lo que sugiere una buena disponibilidad de sitios activos en el PDC, así como una elevada afinidad por ambos contaminantes, particularmente por Ni(II), que mostró eficiencias consistentemente altas.

El análisis de isotermas indicó que el modelo de Langmuir describe adecuadamente el comportamiento de adsorción de ambos metales, lo que sugiere un proceso de monocapa sobre una superficie homogénea con un número limitado de sitios activos. Los parámetros obtenidos confirman una mayor afinidad del adsorbente por Cr(VI) a temperaturas más altas, lo que indica además un posible carácter endotérmico del proceso.

Los modelos de Freundlich, Temkin y Dubinin–Radushkevich complementan la interpretación del sistema, evidenciando la posible heterogeneidad superficial, variaciones en el calor de adsorción y la participación de mecanismos adicionales como la difusión en microporos.

En conjunto, los resultados confirman que los PDC es un adsorbente eficiente y prometedor para la remoción de Cr(VI) y Ni(II) en soluciones acuosas, destacando su desempeño en condiciones variables de pH, concentración y temperatura.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo brindado para la realización de esta investigación a la Dra. Rebeca Yasmín Pérez del Laboratorio de Servicios de Espectroscopía, Cromatografía y Calorimetría, y M.C. Iris Violeta Hernández Cervantes del Laboratorio de Espectrometría de Absorción Atómica y Análisis Químicos; ambas de la División de Ciencias Naturales y Exactas del Departamento de Química, así como al excelente equipo MAPLE Research Group por su excelente colaboración.

Con dedicatoria muy especial a la Dra. Tracy J. Dietz, al Dr. Thomas Barton, Dr. Salvador Hernández Castro, Lic. Gonzalo López Campos y Q.F.B. Martha Oliva Gallaga Ortega por su apoyo incondicional en cada etapa de este trabajo y por estar presentes siempre en la vida de las personas que lideran esta investigación.

Referencias

Alam, M. A., Shaikh, W. A., Alam, M. O., Bhattacharya, T., Chakraborty, S., & Show, B. (2018). Adsorption of As (III) and As (V) from aqueous solution by modified Cassia fistula (golden shower) biochar. *Applied Water Science,* 8(7), 1–14. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0839-y

Bayuo, J. (2021). An extensive review on chromium (vi) removal using natural and agricul-tural wastes materials as alternative biosorbents. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(1), 1193–1207. https://doi.org/10.1007/s40201-021-00641-w

Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management,* 92(3), 407–418. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011

World Health Organization (WHO). (2022). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. *World Health Organization*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064

Marinho, B. A., Cristóvão, R. O., Boaventura, R. A. R., & Vilar, V. J. P. (2019). As(III) and Cr(VI) oxyanion removal from water by advanced oxidation/reduction processes—a review. *Environmental Science and Pollution Research,* 26, 2203–2227. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3595-5

NMX-AA-044-SCFI-2014. Water analysis – measurement of hexavalent chromium in natural Waters, saline Waters, wastewasters and treated wastewaters – test method.

Rajasulochana, P., & Preethy, V. (2016). Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – a comprehensive review. *Resource-Efficient Technologies*, 2(4), 175-184. http://dx.doi.org/10.1016/j.reffit.2016.09.004

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

Rubio Campos, N. Y., Pérez Rodríguez, R. Y., Hernández Barrera, L., Rodríguez Díaz, V. L., Novelo Esquivel, T. A., Nieto Escoto, S., & Zavala Lugo, F. J. (2024). Estudio termodinámico para la remoción de metales pesados empleando materiales de origen agroindustrial. *Jóvenes en la Ciencia,* 28. https://doi.org/10.15174/jc.2024.4442

Sharma, S., & Bhattacharya, A. (2017). Drinking water contamination and treatment techniques. *Applied Water Sciennce*, 7, 1043–1067. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0455-7

Sheikhi, M., & Rezaei, H. (2023). Efficient adsorption of nickel and chromium(VI) from aqueous solutions using lignocellulose nanofibers: Kinetics, isotherms, and thermodynamic studies. *Water Practice and Technology*, 18(5), 1022–1038. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.054

Wahid, S. N., Maharaj, R., Boodlal, D., & Smith, J. V. (2022). The adsorption of phenol on granular activated carbon prepared from waste coconut shell in Trinidad. *Environmental Progress & Sustainable Energy,* 41(1), 1–30. https://doi.org/10.1002/ep.13729

Yu, C., & Yang, J. (2024). Removal of Cr(vi) in wastewater by Fe–Mn oxide loaded sludge biochar. *RSC Adv,* 14(17), 11746–11757. https://doi.org/10.1039/d4ra00169a