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

Estudio experimental sobre la regeneración de borra de café como adsorbente de iones Cromo VI de soluciones acuosas

Experimental Study on the Regeneration of Spent Coffee Grounds as an Adsorbent for Chromium (VI) ions in Aqueous Solutions

Nallely Yunuen Rubio Campos[1], Andrés González García[2], Isela Paulina Castro Becerra[3], Isabel Mercado Villafaña[1], Romina Iriel Mata Fuentes[1], Regina Aurora Donato Gamiño[1]
[1]Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato, nrubio@ugto.mx
[2]Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato.
[3]División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

Resumen

En este estudio se evaluó la desorción de iones Cr(VI) previamente adsorbidos sobre borra de café, así como la capacidad de regeneración del adsorbente mediante ciclos consecutivos de adsorción-desorción. Se analizaron diferentes eluyentes ácidos y alcalinos, observándose que las soluciones de HCl 0.1 M y HNO_3 0.1 M presentaron los mayores porcentajes de recuperación de Cr(VI). La aplicación de tres ciclos de adsorción-desorción mostró porcentajes de recuperación de Cr(VI) entre 25 y 27 %, evidenciando que una fracción importante del metal permanece fuertemente retenida en la borra de café. Este comportamiento sugiere que la adsorción ocurre principalmente mediante interacciones químicas entre los iones Cr(VI) y los grupos funcionales presentes en la biomasa, limitando la desorción completa del metal. No obstante, en los ciclos posteriores se observó un incremento y estabilización de la cantidad recuperada, indicando una liberación progresiva de los sitios de adsorción más accesibles. Los resultados demuestran que la borra de café presenta potencial como adsorbente de bajo costo para la remoción de Cr(VI), indicando que es una alternativa prometedora para recuperación y reutilización.

Palabras clave: borra de café; Cr(VI), desorción; recuperación.

Introducción

La contaminación de los recursos hídricos por metales pesados constituye uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial debido a su persistencia, toxicidad, movilidad y capacidad de bioacumulación en los ecosistemas. Entre estos contaminantes, el cromo ocupa un lugar prioritario por su amplio uso en actividades industriales como la galvanoplastia, el curtido de pieles, la fabricación de pigmentos, la producción de acero inoxidable, la industria textil y el tratamiento de madera. Estas actividades generan efluentes con concentraciones significativas de cromo que, cuando son descargados sin un tratamiento adecuado, ocasionan la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, comprometiendo la calidad del recurso hídrico y representando un riesgo para la salud humana y los ecosistemas acuáticos (Mortalda *et al*., 2023).

En los sistemas acuáticos, el cromo se encuentra principalmente en dos estados de oxidación: cromo trivalente [Cr(III)] y cromo hexavalente [Cr(VI)]. El Cr(III) presenta menor movilidad y toxicidad, mientras que el Cr(VI) es altamente soluble, biodisponible y posee un elevado potencial oxidante, características que favorecen su transporte en el ambiente y su incorporación a los organismos vivos. La exposición prolongada al Cr(VI) se ha asociado con estrés oxidativo, daño al ADN, alteraciones celulares y efectos carcinogénicos, por lo que su eliminación de las aguas residuales constituye una prioridad ambiental y sanitaria (Liu *et al*., 2023; Ma *et al*., 2024). El Cr(VI) es altamente peligroso; de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), ha establecido que el límite máximo permisible de Cr(VI) es de 0.1 mg/L(cromo en agua potable) (United States Environmental Protection Agency, 2009).

Con el propósito de reducir la concentración de cromo en aguas contaminadas, se han desarrollado diversas tecnologías de tratamiento, entre las que destacan la precipitación química, el intercambio iónico, la filtración por membranas, los procesos electroquímicos y la adsorción. Sin embargo, muchas de estas técnicas presentan limitaciones relacionadas con altos costos de operación, elevado consumo energético o la

generación de residuos secundarios. En este contexto, la adsorción continúa siendo una de las alternativas más eficientes y económicamente viables, especialmente cuando se emplean bioadsorbentes obtenidos a partir de residuos agroindustriales (Liu *et al*., 2023).

En los últimos años, la valorización de residuos lignocelulósicos ha adquirido gran relevancia dentro del enfoque de la economía circular. Entre estos materiales destacan los residuos de café, generados en grandes cantidades por la industria cafetera y el consumo doméstico. Estos residuos contienen principalmente celulosa, hemicelulosa, lignina y compuestos fenólicos, cuya abundancia de grupos funcionales hidroxilo, carboxilo y fenólico favorece la adsorción de contaminantes metálicos mediante mecanismos de complejación, intercambio iónico e interacciones electrostáticas (Zhao *et al*., 2024).

La producción mundial anual de café verde se sitúa alrededor de 9.9 a 10.4 millones de toneladas (equivalentes a 165–173 millones de sacos de 60 kg, según el año cafetero). Durante el año cafetero 2022-2023, la producción fue de aproximadamente 165.5 millones de sacos, equivalentes a 9.93 millones de toneladas de café verde. Durante el procesamiento del café se generan grandes cantidades de residuos orgánicos. Para el mismo periodo se estimó una producción global de aproximadamente 40.68 millones de toneladas de residuos y subproductos, provenientes del beneficio, tostado y consumo del café. Esta cantidad representa cerca del 86 % del peso total de las cerezas de café cosechadas. Los principales residuos son: cáscara (husk): 14.68 millones de toneladas; pulpa, mucílago y pergamino: 14.66 millones de toneladas; cascarilla del tostado (silverskin): 0.20 millones de toneladas; borra o café gastado (spent coffee grounds): 11.14 millones de toneladas en peso húmedo (≈6.92 millones de toneladas en base seca) (International Coffee Organization, 2024).

En México, estos residuos representan entre 70 y 90 % del peso del fruto fresco, dependiendo del tipo de procesamiento. Considerando una producción de 1.06 millones de toneladas de café cereza, se estima una generación anual aproximada de: oulpa de café: 420 000–530 000 toneladas; mucílago: 100 000–150 000 toneladas; pergamino y cascarilla: 60 000–90 000 toneladas; residuos totales del procesamiento: 740 000–950 000 toneladas por año, (International Coffee Organization, 2024).

Estudios previo han demostrado el potencial de la borra de café como adsorbente para la remoción de Cr(VI). (Rubio-Campos, *et al*., 2024) logrando alcanzar una capacidad máxima de adsorción cercana a 79.83 mg/g para Cr(VI) sin que el material sufra modificación química en condiciones altamente ácidas, evidenciando que este residuo puede transformarse en un material adsorbente altamente eficiente y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas. Asimismo, (Loulidi *et al*., 2023) reportaron resultados satisfactorios en la adsorción de Cr(VI) utilizando carbón activado derivado de borra de café, confirmando la viabilidad de este residuo como precursor de bioadsorbentes sostenibles.

No obstante, la aplicación industrial de un adsorbente depende no solo de su capacidad de adsorción, sino también de su posibilidad de regeneración y reutilización. La regeneración mediante procesos de desorción permite recuperar parcial o totalmente la capacidad adsorbente, disminuyendo los costos operativos y la generación de residuos sólidos. En consecuencia, la evaluación de diferentes agentes desorbentes constituye un aspecto fundamental para determinar la viabilidad técnica y económica de la borra de café como bioadsorbente en el tratamiento de aguas contaminadas con cromo(VI). Por ello, el presente estudio tiene como objetivo evaluar experimentalmente la regeneración de la borra de café utilizada como adsorbente de Cr(VI) mediante diferentes soluciones desorbentes, con el fin de determinar su potencial de reutilización en procesos de tratamiento de aguas residuales.

Metodología

Preparación del material adsorbente

El material de 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 Cr(VI)

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. Todos los reactivos utilizados fueron de calidad analítica (99.9% de pureza). Los experimentos se realizaron a temperatura constante de 25°C. 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.

Experimentos de adsorción – desorción de Cr(VI) sobre borra de café

Se pusieron en contacto 0.25 g de borra de café con 50 mL de solución de iones de cromo de 100 mg/L en un vaso de precipitados, pH 2 a temperatura ambiente y agitación utilizando un agitador magnético CORNING PC-420D a 280 rpm. La mezcla se agitó durante 24 horas, con la finalidad de saturar el adsorbente. Una vez finalizado el tiempo, la muestra se filtró utilizando papel filtro Whatman de 125 mm. El filtrado se analizó mediante el método para la 1,5-difenilcarbazida por espectrofotometría de UV-Visible (NMX-AA-044-SCFI-2014) (Figura 1). El residuo se secó a temperatura ambiente para su posterior uso en las pruebas de desorción.



Figura 2. Determinación de Cr(VI) por Espectrofotometría de UV-Visible.

El proceso de desorción se llevó a cabo durante 2 horas y agitación continua, diferentes soluciones ácidas y alcalinas (ácido clorhídrico 0.1 M, ácido nítrico 0.1 M, ácido cítrico 0.1 M, hidróxido de sodio 0.1M y agua) con 0.25 g de material saturado en varias adiciones. El proceso se repitió hasta que el contenido de cromo(VI) fuera constante en la solución.

Las concentraciones de Cr(VI) recuperadas en cada adición y determinadas por UV-Visible, se sumaron a fin de determinar la cantidad total de ion metálico desorbido. De aquí se selecciona la solución a la cual se obtuvo la mayor recuperación de Cr(VI). Con esto se pretende demostrar que la borra de café puede ser usada eficientemente en varios ciclos de adsorción-desorción y, además, que el Cr(VI) recuperado puede ser utilizado en algún proceso y que el agua tratada cumpla con la normatividad vigente.

Regeneración del adsorbente

El estudio de desorción permite confirmar el mecanismo de adsorción y evaluar la posibilidad de reutilizar tanto el adsorbente como el adsorbato. La reversibilidad del proceso de adsorción es proporcional a la naturaleza de la unión establecida entre el adsorbente y el adsorbato.

El potencial de regeneración del adsorbente usado se evaluó utilizando dos eluyentes diferentes: HCl 0.1 M y HNO_3 0.1 M. Se mezclaron 0.25 g de borra de café con 50 mL de una solución de Cr(VI) con una concentración de 500 mg/L, manteniendo la mezcla bajo agitación a pH 2 durante 1 h. Después del

experimento de adsorción, la borra de café se recuperó mediante filtración y posteriormente se secaron durante 1h a temperatura ambiente. A continuación, el material seco se transfirió a los diferentes eluyentes. La desorción se llevó a cabo durante 1 h con agitación a 280 rpm.

El procedimiento se repitió hasta que la cantidad de Cr(VI) en solución permaneciera constante y el contenido de ion metálico se cuantificó mediante Espectrofotometría de UV-Visible.

Resultados

Desorción de iones Cr(VI) después de su adsorción sobre borra de café.

En la Figura 2 se muestra el porcentaje de Cr(VI) recuperado frente a soluciones ácidas y básicas. Como se puede apreciar en esta Figura, el tratamiento con HCl 0.1M y HNO_3, permitió recuperar un mayor porcentaje del ion metálico, seguido del tratamiento con NaOH 0.1M. Sin embargo, el Cr(VI) cuantificado en este último se presentaba con una coloración anaranjada que no corresponde a la coloración con la difenilcarbazida, esto puede deberse a que es posible que, en este rango de pH, el Cr(VI) está formando algunos complejos, y/o que el cromo sufra algún cambio de oxidación. Como el propósito de es recuperar el Cr(VI) para reintegrarlo al proceso se optó el tratamiento con HNO_3 0.1 M y HCl 0.1 M.

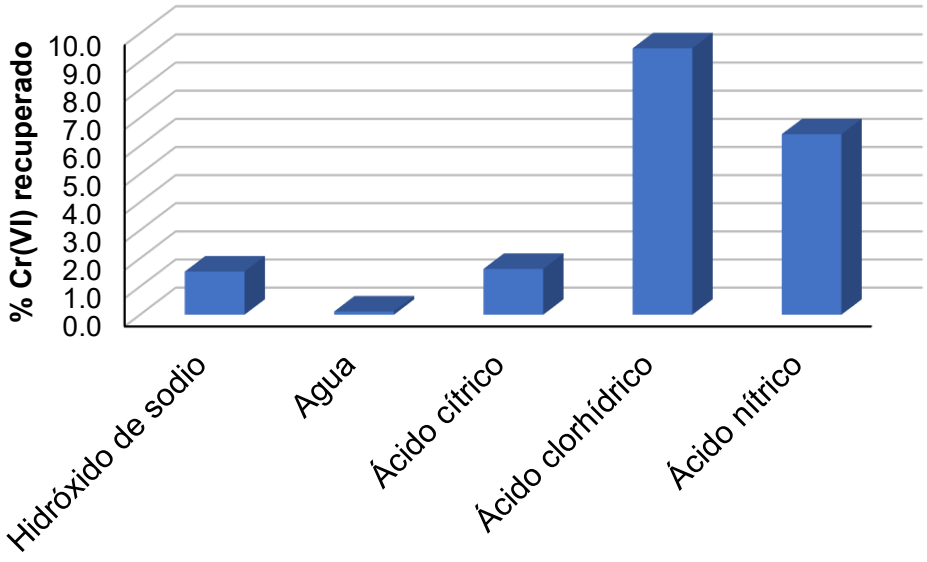


Figura 2. Desorción de Cr(VI) con diferentes soluciones.



Figura 3. Determinación de Cr(VI) por Espectrofotometría de UV-Visible.

Regeneración del adsorbente

Después de llevar a cabo tres ciclos de adsorción-desorción empleando las soluciones ácidas mencionadas en la metodología, se cuantificó la cantidad de Cr(VI) adsorbida y desorbida en cada ciclo. Los resultados se presentan en la Figura 4.

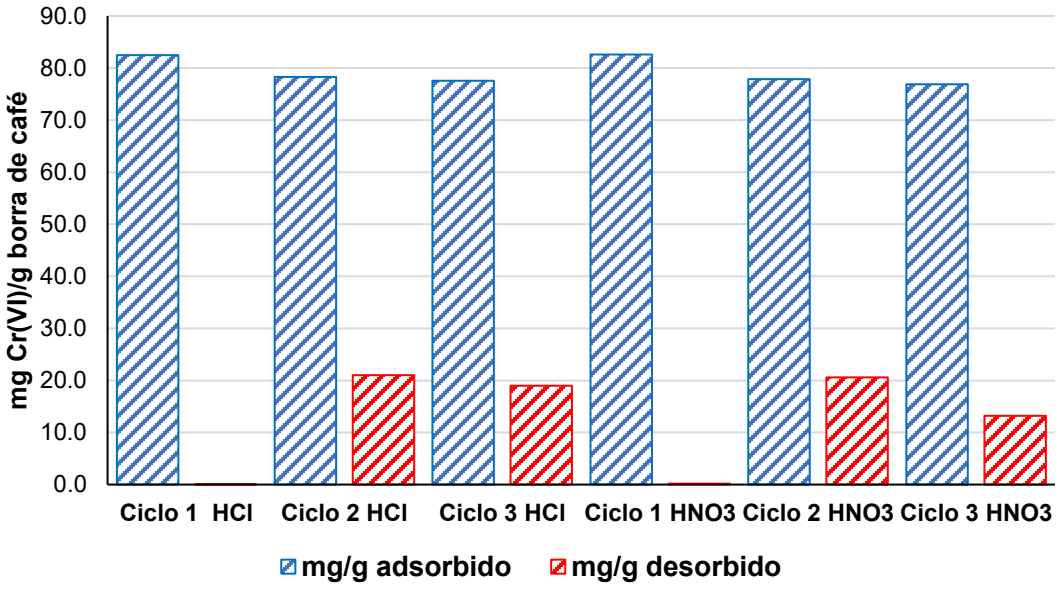


Figura 4. Recuperación de Cr(VI) usando soluciones ácidas (HCl 0.1 M y HNO_3 0.1M).

Como se puede observar en la Figura 4, la cantidad recuperada en el primer ciclo empleando las dos soluciones ácidas es baja, esto se debe a que una fracción importante de los iones metálicos se encuentra unida al adsorbente mediante interacciones químicas fuertes. En la Figura 5, se presenta el porcentaje de recuperación en cada ciclo, observándose porcentajes que oscilan entre 25-27 %. En estas condiciones, el agente desorbente no logra romper completamente los enlaces entre el metal y los grupos funcionales de la superficie del adsorbente, lo que indica que la quimisorción constituye el mecanismo predominante de

retención (Rubio-Campos *et al*., 2025). En los ciclos 2 y 3 la cantidad del metal recuperada aumenta, permaneciendo estable.

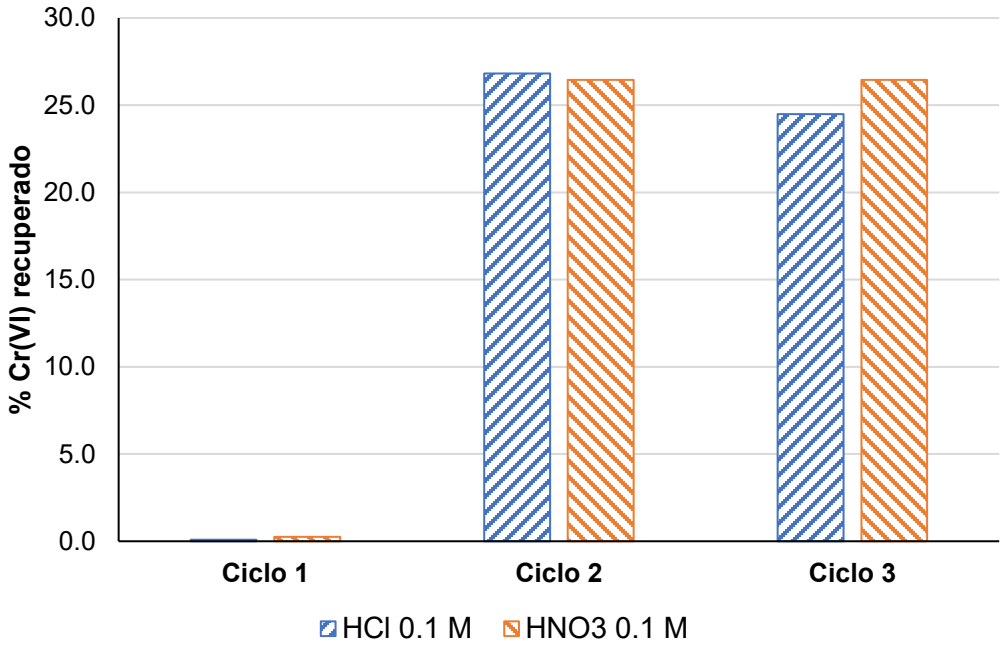


Figura 5. Porcentaje de recuperación de Cr(VI) después de tres ciclos de adsorción-desorción.

Conclusiones

La borra de café presentó capacidad para adsorber y posteriormente liberar iones Cr(VI), demostrando su potencial como biomaterial adsorbente para el tratamiento de soluciones contaminadas con este metal. La presencia de grupos funcionales en su estructura, como hidroxilos, carboxilos y grupos fenólicos, favorece la interacción con las especies de Cr(VI).

La eficiencia de desorción del Cr(VI) depende del tipo de agente desorbente empleado. Las soluciones de HCl 0.1 M y HNO_3 0.1 M mostraron los mayores porcentajes de recuperación del ion metálico, mientras que el tratamiento con NaOH 0.1 M presentó una menor eficiencia y generó una coloración anaranjada durante la determinación espectrofotométrica, lo que sugiere posibles interferencias químicas asociadas a cambios en la especiación del cromo, formación de complejos o modificaciones en su estado de oxidación.

La regeneración de la borra de café mediante ciclos consecutivos de adsorción-desorción mostró una recuperación limitada de Cr(VI), con porcentajes entre 25 y 27%. Este comportamiento indica que una fracción importante del metal permanece fuertemente retenida en la superficie del adsorbente, posiblemente debido a interacciones químicas entre los iones cromato y los grupos funcionales presentes en la biomasa.

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 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. A la mente maestra y el apoyo incondicional para encontrar a nuevas generaciones de investigadores y científicos: Dra. Beatriz Eugenia Rubio Campos.

Referencias

International Coffee Organization. (2024). Coffee Development Report 2022–23: Beyond Coffee – Towards a Circular Coffee Economy. International Coffee Organization. Coffee Development Report 2022–23 (PDF)

Liu, B., Xin, Y.-N., Zou, J., Khoso, F. M., Liu, Y.-P., Jiang, X.-Y., Peng, S., & Yu, J.-G. (2023). Removal of Chromium Species by Adsorption: Fundamental Principles, Newly Developed Adsorbents and Future Perspectives. *Molecules*, 28, 639. https://doi.org/10.3390/molecules28020639

Loulidi, I., Jabri, M., Amar, A., Kali, A., A. Alrashdi, A., Hadey, C., Ouchabi, M., Abdullah, P. S., Lgaz, H., Cho, Y., et al. (2023). Comparative Study on Adsorption of Crystal Violet and Chromium (VI) by Activated Carbon Derived from Spent Coffee Grounds. *Appl. Sci.*, 13, 985. https://doi.org/10.3390/app13020985

Ma, L., Chen, N., Feng, Ch., & Yang, Q. (2024). Recent advances in enhanced technology of Cr(VI) bioreduction in aqueous condition: A review. *Chemosphere*, 351, 141176. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141176

Mortada, W., El-Naggar, A., Mosa, A., Palansooriya, K. N., Yousaf, B., Tang, R., Wang, S., Cai, Y., & Chang, S. (2023). Biogeochemical behaviour and toxicology of chromium in the soil-water-human nexus: A review. *Chemosphere*, (331), 138804. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138804

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

United States Environmental Protection Agency. (2009). National primary drinking water regulations (EPA 816-F-09-004). U.S. Environmental Protection Agency.

Zhao, N. (2024). Spent coffee grounds: Present and future of environmentally friendly applications on industries—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104312. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104312