

Remoción de cromo hexavalente de un lixiviado industrial utilizando un compuesto biocarbon-nanopartícula e impacto de las nanopartículas de Cerio en el tratamiento de aguas residuales

Removal of Hexavalent Chromium from Industrial Leachate Using a Biochar-Nanoparticle Composite and the Impact of Cerium Nanoparticles in Wastewater Treatment

Martínez Dávalos Giovanna Del Rocío¹, Navarro Mendiola Pedro Alberto², Díaz Reyes Sofía Jimena³, Cuevas Rodríguez Germán⁴, Bernal Martínez Arodí⁵

¹Universidad de Guanajuato

gdr.martinezdavalos@ugto.mx¹, pa.navarromendiola@ugto.mx², sj.diazreyes@ugto.mx³, german28@ugto.mx⁴, arodiberna@ugto.mx⁵,

Resumen

Este estudio se enfocó en la síntesis de biocarbón a partir de olotes de maíz (*Zea mays*) para la eliminación de cromo hexavalente (Cr (VI)) de lixiviados industriales. Se realizó la caracterización fisicoquímica del lixiviado, la determinación de la máxima remoción de Cr (VI) mediante isoterma de adsorción y la aplicación de un método de impregnación con nanopartículas de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. La hipótesis estipulada de que la impregnación mejoraría la remoción de Cr (VI) fue confirmada, mostrando que el biocarbón con impregnación logró una remoción significativamente mayor en comparación con el biocarbón no impregnado.

Palabras clave: remoción; lixiviado; cromo (VI); biocarbón; impregnación.

Abstract

This study focused on the synthesis of biochar from corn cobs (*Zea mays*) for the removal of hexavalent chromium (Cr (VI)) from industrial leachates. The physicochemical characterization of the leachate was performed, along with the determination of the maximum Cr (VI) removal using adsorption isotherms. Additionally, an impregnation method with $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles was applied. The hypothesis that impregnation would enhance Cr (VI) removal was confirmed, showing that impregnated biochar achieved significantly higher removal compared to non-impregnated biochar.

Introducción

El agua es vital para la vida en la Tierra, pero la actividad humana la ha contaminado con compuestos peligrosos. En 2010, entre 2.200 y 3.200 millones de personas experimentaron estrés hídrico al menos un mes al año, representando entre el 32% y el 46% de la población mundial de esa época¹. En 2020, el 44% de las aguas residuales domésticas no se trató de forma segura antes de ser vertidas al ambiente.

Uno de los contaminantes más preocupantes es el cromo hexavalente (Cr VI), altamente tóxico y cancerígeno². proviene de industrias como la galvanoplastia, fertilizantes, curtiduría, acero, textil y generación

¹ World Health Organization: WHO. (2023, 13 septiembre). Agua para consumo humano. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

² Alexander, R. C. A., Eloy, I. C., & María, M. V. (s.f.). Caracterización y recuperación de sales de cromo hexavalente de un pasivo ambiental. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000400010

de energía. Las industrias son las principales fuentes de contaminación del agua, descargando residuos sin tratamiento adecuado. Estos residuos liberan lixiviado, un líquido que causa graves daños al ambiente debido a su alta concentración de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo metales pesados y sales³.

El biocarbón (BC) es un material rico en carbono, obtenido de la pirólisis de biomasa, eficaz para adsorber contaminantes debido a su amplia disponibilidad y bajo costo. Sin embargo, su uso en el tratamiento de agua es limitado. El BC puede mejorarse combinándolo con nanopartículas (NPs), que tienen una gran área superficial y propiedades magnéticas que permiten su fácil separación del efluente⁴.

Los residuos agrícolas se convierten en BC, que luego se impregna con NPs para adsorber como de los sistemas acuosos. Después del proceso de adsorción, las propiedades magnéticas de las NPs permiten una fácil separación del efluente. Este BC-NP usado puede ser regenerado y reutilizado, cerrando el ciclo de uso de materiales y minimizando los residuos. Esta integración de BC con NPs no solo mejora la eficiencia de la remoción de Cr (VI), sino que también promueve la sostenibilidad y la reducción de residuos, alineándose con los principios de la economía circular.

Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo, las actividades se organizaron en tres etapas:

Etapas 1: Caracterización fisicoquímica del lixiviado

Para determinar la concentración de Cr (VI) se utilizó el procedimiento señalado en la NMX-AA-044-SCFI-2014, donde se realizó una curva de calibración con estándares a diferentes concentraciones de Cr (VI) (10, 25, 30, 40 y 50 mg/L) y se mide espectrofotométricamente a longitud de onda 540 nm.

Etapas 2: Elaboración de biocarbón e impregnación

Se recolectaron 151 g de olote, se lavó con agua de la llave para eliminar el polvo y se secó en un horno a 105 °C durante 24 y después se trituró. Con una relación 1:6 (olote: disolvente) se realizó una desmineralización ácida, aplicando HNO₃ 6N como agente lixivante, con agitación constante durante 30 min. Posteriormente, se enjuagó con agua destilada y finalmente se deshidrató por 72 h [6]. En la figura 1 se presenta los olotes después de la limpieza.



Figura 1. Limpieza y secado del olote.

³ Luna, Y., Otal, E., Vilches, L., Vale, J., Querol, X., Fernández, C., 2007. Use of zeolitised cal fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study. *Waste Management*. 27. 1877-1883.

⁴ Zhang, Y., Wu, B., Xu, H., Liu, H., Wang, M., He, Y., Pan, B. 2016. Nanomaterials-enabled water and wastewater treatment. *NanoImpact*. 3(4). 22-39

Para la pirólisis, el material secado se colocó en crisoles de porcelana con tapa para garantizar una atmósfera baja en oxígeno y se calentó en una mufla a 400 °C durante 120 min. Posteriormente se enfrió a temperatura ambiente bajo una atmósfera sin oxígeno. Después, el residuo se molió y se pasó a través de un tamiz de 0.250 mm, el producto final se nombre BC. Finalmente, se determinó el rendimiento de la biomasa mediante la ecuación (1), [8].

$$y_m = \frac{m_{\text{carb}}}{m_{\text{biom}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Donde, y_m es la relación de la masa de producto carbonizado m_{carb} a la masa de biomasa cruda m_{biom} y, por lo tanto, describe la cantidad de masa original que queda en el residuo sólido de la pirolisis.

Elaboración del BC (pirólisis)

El material seco se colocó en crisoles de porcelana y se carbonizó en una mufla a 400 °C durante 120 minutos. Transcurrido ese tiempo se enfrió a temperatura ambiente bajo una atmósfera sin oxígeno. Después de la carbonización, el residuo se molió y se pasó a través de un tamiz de 0.250 mm, el producto fue llamado BC (figura 2).



Figura 2. Elaboración de Biocarbón: biomasa pirolisada, molienda, tamizaje y producto final.

Impregnación del biocarbón con NPs de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

La impregnación se realizó mediante coprecipitación química a una temperatura de 80 °C. Se disolvió cloruro ferroso y cloruro férrico y posteriormente se añadió NaOH 5 M para ajustar el pH a 10, posteriormente se adicionó a la mezcla el biocarbón. La mezcla se separó posteriormente por centrifugación y el precipitado se secó en estufa a 60 °C hasta peso constante [8], el producto formado se nombró IBC.

Etapa 3: Pruebas de absorción

Las capacidades de adsorción de los BC e IBC se realizaron a través de isoterma de adsorción, las cuales se realizaron en botellas serológicas de capacidad de 120 mL. En cada botella se colocaron 50 mL de lixiviado industrial disuelto a concentraciones iniciales de 10, 25, 50, 75 y 100 de Cr (VI) y 0.5, 1, 2 y 4 g/L BC o de I-BC, el pH se ajustó a 2. En la tabla 1 se muestran las condiciones experimentales para las pruebas de adsorción.

Tabla 1.- Condiciones para la elaboración de las isotermas de absorción

mg Cr (VI) Inicial	BC g/L	BCI	pH	Tiempo de reacción
10				
25				
50	0.5, 1, 2.5, 4		2	0, 1, 2, 3, 4, 24
75				
100				

Estas fueron colocadas a una agitación de 250 rpm y temperatura ambiente durante máximo 24 h con toma de muestra de cada hora. En la figura 3 se muestra las soluciones de lixiviado a las diferentes concentraciones y las pruebas de adsorción.



Figura 3. Proceso de adsorción con disolución de lixiviado

Las muestras fueron pasadas a través de un filtro de nitrocelulosa de 0.22 μm y se determinó el pH, conductividad eléctrica y concentración de Cr (VI) por el método de la difenilcarbazida, para obtener el valor de la concentración en equilibrio, C_e .

La eficiencia o porcentaje de remoción del Cr (VI) se determinará por la ecuación:

$$\%R = \left(\frac{C_o - C_f}{C_o} \right) * 100 \quad (2)$$

Donde:

% R: Porcentaje de remoción
 C_o : Concentración inicial Cr (VI) (mg/L)
 C_f : Concentración final Cr (VI) (mg/L)

Discusión y resultados

Caracterización del lixiviado

En la tabla 2 se muestran las características fisicoquímicas de los lixiviados obtenidos de la industria química. El lixiviado representa un alto grado de toxicidad. El pH fue de 12.57 sugiere un entorno altamente alcalino, lo cual es común en lixiviados de ciertos procesos industriales. La conductividad eléctrica fue de 154 mS/cm indica una alta concentración de iones disueltos, reflejando una carga iónica significativa en el lixiviado.

Tabla 2.- Caracterización fisicoquímica de los lixiviados de la industria química

Parámetro	Unidad	Resultado
pH		12.57 \pm 0.01
Conductividad eléctrica	mS/cm	154 \pm 2
STT	g/L	78.305 \pm 0.45
STV	g/L	15.57 \pm 0.04
STF	g/L	62.735 \pm 1
SDT	g/L	75.565 \pm 1.03
SDV	g/L	14.84 \pm 0.12
SDF	g/L	60.72 \pm 1.71
SST	g/L	2.74 \pm 0.19
SSV	g/L	2.015 \pm 0.01
SSF	g/L	0.725 \pm 0.073
Cr (VI)	mg/l	7012.83 \pm 35.6

La mayor parte de los contaminantes está en forma disuelta (78.305 g/L), lo cual es consistente con la alta conductividad eléctrica observada. Dentro de los sólidos disueltos, el contenido de sólidos fijos fue 60.72 g/L predominan sobre los volátiles (14.84 g/L), indicando una alta presencia de minerales o sales inorgánicas.

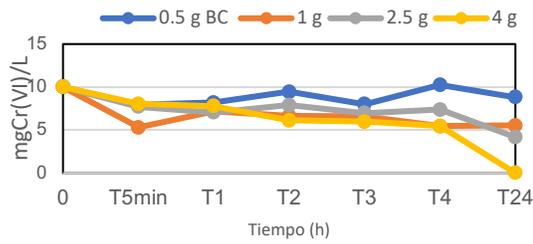
La presencia de una concentración de 7012.83 ± 35.6 mg/L de Cr(VI) en un lixiviado industrial constituye una grave problemática ambiental y de salud, que representa una clara violación a la normativa mexicana. La Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 establece los criterios para la identificación, clasificación y listado de los residuos peligrosos en México, en la cual establece un límite máximo permisible de 5 mg/L de Cromo en el extracto PECT.

Pruebas de absorción

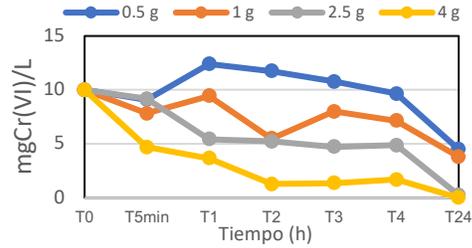
En la figura 4 se presenta los resultados de las pruebas de adsorción en donde se evaluó la remoción de Cr (VI) a diferentes dosis de BC y IBC y diferentes concentraciones de Cr (VI). Con una dosis de 2,5 g/L se alcanzó el 97 por ciento de remoción en 24 horas para el IBC en comparación con el BC el 100 por ciento se obtuvo con una dosis de 4g/L de BC. Con 25 mg Cr (VI)/L se muestra que con el BC los residuales de Cr (VI) permanecieron alrededor de 13 mg Cr(VI)/L para todas las dosis de BC, excepto para la de 4 g Cr(VI)/L, con esta se obtuvo un residual de 7.82 mg Cr (VI)/L a las 24 h. Para el IBC se muestran una mejor adsorción en cada una de las dosis, siendo la adsorción proporcional al aumento de la dosis de IBC. Con 4 g/L de IBC se alcanzó el 100 por ciento de remoción del Cr (VI). Con el incremento de la concentración arriba de 50, 75 y 100 mg Cr(VI)/L empleando el BC se observa que la adsorción es estable posterior a los 5 min de la adsorción, la máxima remoción obtenida fue por debajo del 50 por ciento. La mejor dosis de BC fue la de 4 g/L, con la que se logró remover hasta un 68.6 por ciento de Cr (VI)/L en 24 h.

A partir de 50 mg Cr(VI)/L, con el IBC disminuyó la adsorción, no alcanzando el 100 por ciento de remoción. Aunque fueron mejores en comparación al BC. De acuerdo con (Corona, 2023) con 1 g/L de IBC y 10 mg Cr(VI)/L se obtuvieron remociones del 100 por ciento, no se presentándose lo mismo en este estudio. En estas condiciones del estudio mencionado, se alcanzaron con 2,5 g/L de IBC.

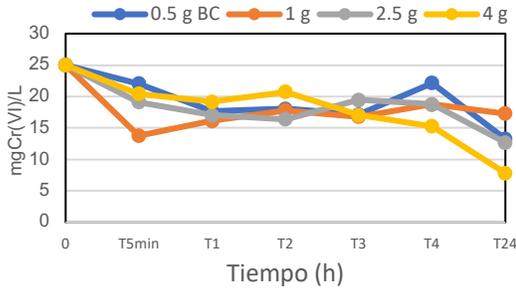
¹Corona Rivera, E. J. (2023). *Implementación de biochar con nanopartículas para el tratamiento de lixiviados con alto contenido de cromo hexavalente* (Tesis de maestría). Universidad de Guanajuato.



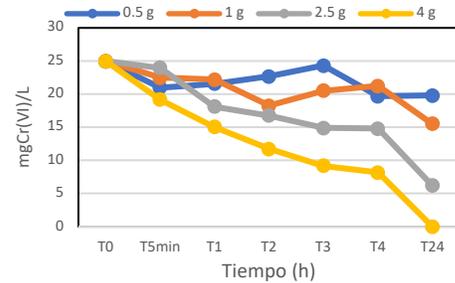
a) 10 mg Cr (VI)/L + BC.



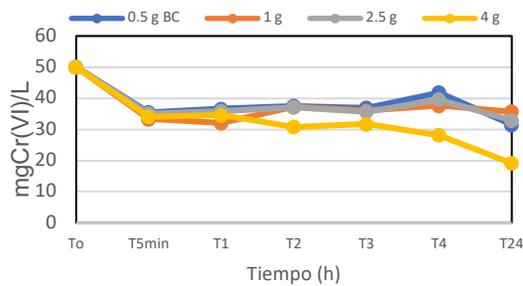
f) 10 mg Cr (VI)/L + IBC.



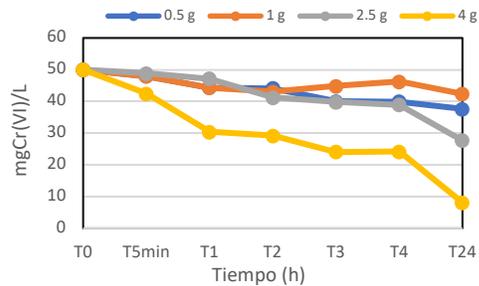
b) 25 mg Cr (VI)/L + BC.



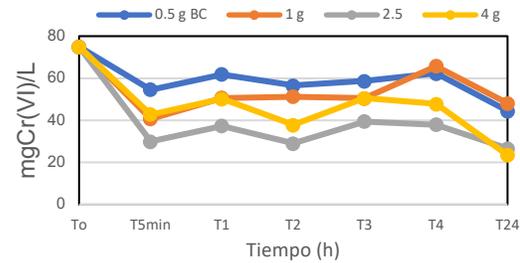
g) 25 mg Cr (VI)/L + IBC.



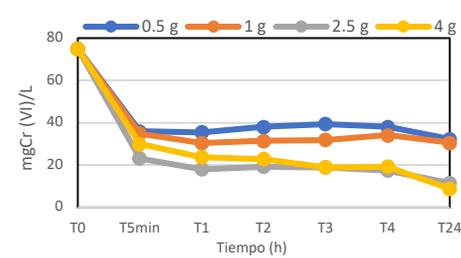
c) 50 mg Cr (VI)/L + BC.



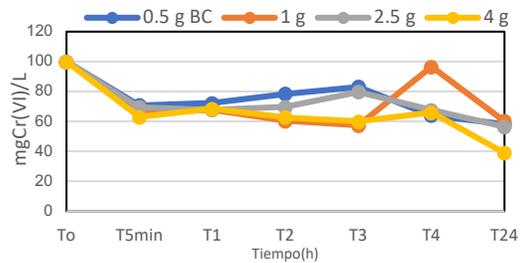
h) 50 mg Cr (VI)/L + IBC.



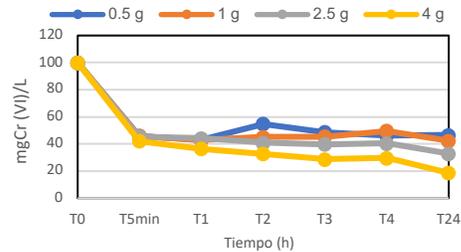
d) 75 mg Cr (VI)/L - BC.



i) 75 mg Cr (VI)/L + IBC..



d) 100 mg Cr (VI)/L + BC.



j) 100 mg Cr (VI)/L + IBC.

Figura 4.- Remoción de Cr (VI) en la pruebas de adsorción a diferentes concentraciones iniciales de Cr (VI). BC y IBC.

Resumen porcentajes de remoción

A continuación, se muestran los mejores porcentajes de remoción con su respectivo tiempo de contacto. Los resultados muestran consistentemente que el IBC tuvo una mayor eficiencia de remoción de Cr (VI) en comparación con el BC en la mayoría las dosis y tiempos evaluados. En la tabla 3 se observa que con la concentración de CR (VI) de 10 mg/L, el incremento de la dosis de BC, es proporcional a la remoción de Cr (VI), este mismo efecto se observó con el IBC, alcanzando mayores porcentajes de remoción en cada una de las dosis. Ambos adsorbentes lograron el 100 por ciento de remoción con 4 g/L y en un tiempo de contacto de 24 h.

Tabla 3.-: Porcentajes de remoción de 10 mg Cr (VI)/L con distintas dosis de BC y IBC, pH= 2

g/L BC; I-BC	BC			I-BC		
	Efluente mg Cr (VI)/L	Tiempo h	% remoción	Efluente mg Cr (VI)/L	Tiempo h	% remoción
0.5	7.98	3	20.11	4.49	24	55.14
1	5.46	4	45.35	3.8	24	61.9
2.5	4.17	24	58.27	0.25	24	97.5
4	0	24	100	0	24	100

En la Tabla 4 se observa que IBC puede lograr una remoción más alta en tiempos más cortos: 56.96% en solo 1 h con una dosis de 0.5 g/L y el mismo porcentaje en 2 h con 1 g/L de dosis. Un hallazgo relevante es que el IBC puede lograr altos porcentajes de remoción en tiempos cortos, sin esperar 24 h. En comparación, el BC requiere más tiempo para alcanzar eficiencias de remoción similares o menores, destacando la superioridad del IBC en cuanto a rapidez y eficiencia.

Tabla 4.-: Porcentajes de remoción de 100 mg Cr (VI)/L con distintas dosis de BC y IBC, pH= 2

g/L BC; I-BC	BC			I-BC		
	Efluente mg Cr (VI)/L	Tiempo h	% remoción	Efluente mg Cr (VI)/L	Tiempo h	% remoción
0.5	58.21	24	41.78	43.05	1	56.96
1	57.41	3	42.58	43.05	2	56.96
2.5	56.4	24	43.59	32.94	24	67.07
4	38.88	24	61.12	18.66	24	81.34

Conclusión

La impregnación de biocarbón con nanopartículas de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ demuestra ser una solución altamente eficiente para la remoción de Cr (VI) en lixiviados industriales. Se alcanzaron el 100 por ciento de remoción con dosis bajas de Cr (VI) contenido en los lixiviados industriales. Esta metodología mejora la capacidad de adsorción, permitiendo una remoción efectiva en tiempos reducidos, menor cantidad de adsorbente y ofreciendo una alternativa rápida.

Además, al utilizar biocarbón derivado de olotes de maíz, un residuo agrícola, el proceso se alinea con los principios de economía circular. Esta estrategia no solo optimiza el uso de materiales reciclados, sino que también reduce los costos asociados al tratamiento de aguas residuales y minimiza el impacto ambiental al dar un nuevo valor a los residuos agrícolas.