

Bioadsorción de flúor en medio acuoso utilizando bagazo de agave con activación química: evaluación de isotermia

Fluoride bioadsorption in aqueous medium using chemically activated agave bagasse: isotherm evaluation

Getsemaní Román Lombera¹, Aura Cristina Alvarado Villafán¹, Guadalupe Vázquez Rodríguez¹, Eduardo Jahir Gutiérrez Alcántara², Adrian Zamorategui Molina¹, David Tirado Torres^{1*}

¹ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez No. 77 Col. Centro Guanajuato, Gto., México.

² Universidad Autónoma de Campeche, Av. Agustín Melgar S/N, Buena Vista, Campeche, México.
d.tirado@ugto.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

La disponibilidad de agua para uso y consumo humano presenta una problemática en los contextos de salud y ambiental. En los estados del centro y norte de México la asociación mineralógica, así como la constitución de los yacimientos mantiene elementos potencialmente tóxicos para la salud y los ecosistemas. Los elementos críticos reportados en repetidas ocasiones y que rebasan los límites permitidos por la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano son flúor, arsénico y plomo. La escasez limitada del recurso hídrico ha propiciado la búsqueda de tecnologías y estrategias para la eliminación o retención de los elementos tóxicos en diversas matrices que van desde zeolitas hasta materiales obtenidos de residuos agrícolas. El presente proyecto tiene como objetivo evaluar el bagazo de agave como material bioadsorbente de flúor en medio acuoso. Esto debido al riesgo para la salud que representa una alta concentración de flúor, la cual puede provocar a largo plazo problemas como fluorosis dental y esquelética, así como afecciones al sistema neurológico y renal. La evaluación se llevó a cabo mediante el tratamiento y activación química ácida del material adsorbente para su aplicación en isotermas de adsorción. Los resultados demostraron que el bagazo de agave activado es un bioadsorbente eficaz para la remoción de flúor en soluciones acuosas, alcanzando una capacidad máxima de adsorción de 13.7 mg/g.

Palabras clave: Adsorción, bagazo de agave, bioadsorción, flúor.

Introducción

La presencia de flúor en aguas subterráneas es algo que representa un riesgo importante para la salud pública, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde esta fuente hídrica es la principal opción para consumo humano. Aunque el flúor es beneficioso en concentraciones bajas para la prevención de caries dentales, su ingesta prolongada en niveles elevados puede causar fluorosis dental y esquelética, y en casos severos, afectar el sistema neurológico y renal. Lo anterior ha generado preocupación en muchas los municipios de Irapuato, Guanajuato y San Felipe en el estado de Guanajuato, México (Cancer.gov, 2024; Fluoride Action Network, 2023).

Ante esta problemática, se han buscado alternativas accesibles y sostenibles para la remoción de flúor del agua. Una de las tecnologías emergentes es la bioadsorción, que consiste en el uso de materiales de origen biológico capaces de retener contaminantes mediante interacciones fisicoquímicas en su superficie. Entre los residuos agrícolas con potencial bioadsorbente destaca el bagazo de agave, subproducto generado en grandes cantidades por la industria tequilera y mezcalera del país. Este residuo contiene compuestos como celulosa, hemicelulosa y lignina, que presentan sitios activos capaces de retener aniones como el fluoruro (Sierra *et al.*, 2019; Franco Mota *et al.*, 2022).

El bagazo de agave, además de ser abundante y de bajo costo, puede ser transformado en un material con alta capacidad adsorbente mediante tratamientos simples, lo que lo convierte en una opción viable para el tratamiento de aguas contaminadas, especialmente en comunidades rurales con recursos limitados (Franco Mota *et al.*, 2022). El presente trabajo evalúa la capacidad de bioadsorción del bagazo de agave para la remoción de flúor en soluciones acuosas, mediante el análisis de isotermas de adsorción; lo que permitirá determinar la eficiencia del material, su capacidad máxima de adsorción y las condiciones óptimas de operación, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías de remediación hídrica sostenibles y al aprovechamiento de residuos agroindustriales.

Metodología

Obtención y pretratamiento de la muestra

El bagazo de agave fue recolectado como residuo postindustrial en una planta productora de mezcal del estado de Guanajuato. Posteriormente, se eliminaron impurezas mediante enjuague con agua destilada y se secó en una estufa a 70 °C durante 24 horas. El material seco fue molido y tamizado, obteniéndose una fracción granulométrica de 100–500 µm.

Activación de la muestra

Para mejorar la capacidad adsorbente del bagazo, se aplicó HCl 0-2 M como agente de activación química. La activación consistió en sumergir el bagazo en una solución 0.2 M de HCl, con una relación sólido: líquido de 1:10 (g/mL), bajo agitación constante por 4 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, el material fue filtrado, enjuagado con agua destilada hasta pH neutro, secado nuevamente a 70 °C y retamizado para su almacenamiento y uso posterior.

Preparación de soluciones modelo de flúor

Se prepararon soluciones sintéticas de fluoruro sódico (NaF) en agua destilada, con concentraciones de 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mg/L. El pH de las soluciones fue ajustado a 6.5 ± 0.2 utilizando hidróxido de sodio (NaOH) o HCl 0.1 M.

Ensayos de adsorción: prueba de isoterma

Los ensayos se realizaron en frascos Erlenmeyer de 250 mL con 100 mL de solución y 0.1 g de bioadsorbente, bajo agitación constante (200 rpm) durante 22 horas a 25 °C. Finalizado el tiempo de contacto, las muestras fueron filtradas y se midió la concentración remanente de flúor utilizando un medidor multiparamétrico Orion star A329 con electrodo de ion selectivo para flúor.

Análisis de datos

Como los datos de adsorción se ajustaron a una relación lineal entre q_e y C_e , se consideró que el modelo de adsorción sigue una isoterma lineal (modelo de distribución de Henry).

Resultados y discusiones

Caracterización por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

El análisis de FTIR del bagazo de agave activado reveló bandas características asociadas a grupos funcionales activos en el proceso de adsorción. Las bandas observadas en 3400 cm⁻¹ corresponden al estiramiento O-H de grupos hidroxilo y agua residual, mientras que las señales en 2920 y 2850 cm⁻¹ indican vibraciones C-H típicas de grupos metíleno. La presencia de picos en 1740 y 1620 cm⁻¹ está relacionada con grupos carbonílicos (C=O) como ácidos carboxílicos y ésteres, que pueden participar en interacciones electrostáticas e intercambio iónico con el anión flúor.

Tabla 1. Bandas de absorción de IR en residuos de agave.

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Estiramiento	Compuesto
3400	O-H	Grupos hidroxil y agua
2920, 2850	C-H	Metileno
1740, 1620	C=O	Aldehidos, cetonas, ácidos carboxílicos y ester

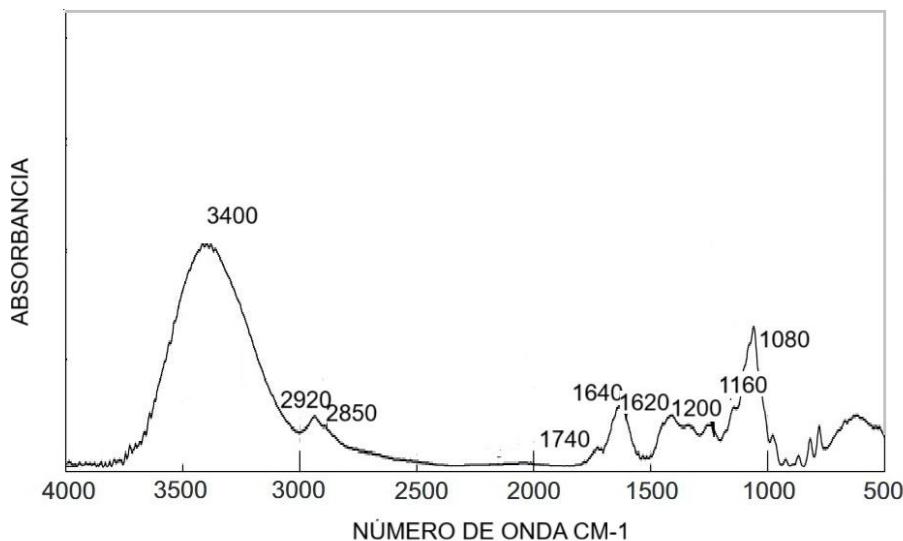


Figura 1. Análisis de FTIR de los residuos de agave realizada de 4000 a 400 cm⁻¹, con una resolución de 4 cm⁻¹ y velocidad de barrido de 0,5 cm⁻¹.

Isoterma de adsorción

El modelo de Henry asume que la cantidad de soluto adsorbido es directamente proporcional a la concentración del soluto en solución en equilibrio:

$$(Ec\ 1) \quad q_e = K_H * C_e$$

q_e : cantidad de adsorbato por gramo de adsorbente (mg/g)

C_e : concentración en equilibrio (mg/L)

K_H : constante de Henry (L/g), pendiente de la recta

El comportamiento de adsorción se ajustó adecuadamente al modelo lineal, con una ecuación obtenida de la forma $q_e = 0.52 C_e - 0.18$ y un coeficiente de correlación (R^2) elevado (Figura 2). Esto indica que la adsorción de flúor en bagazo de agave sigue un patrón proporcional a la concentración de equilibrio, siendo favorecida por la presencia de sitios activos homogéneos. La capacidad máxima alcanzada fue de 13.7 mg/g en condiciones de laboratorio. La capacidad de adsorción obtenida es comparable con la de otros bioadsorbentes reportados en la literatura, como cáscara de naranja (10.8 mg/g) y residuos de té verde (11.5 mg/g), lo que posiciona al bagazo de agave como una alternativa competitiva y de bajo costo.

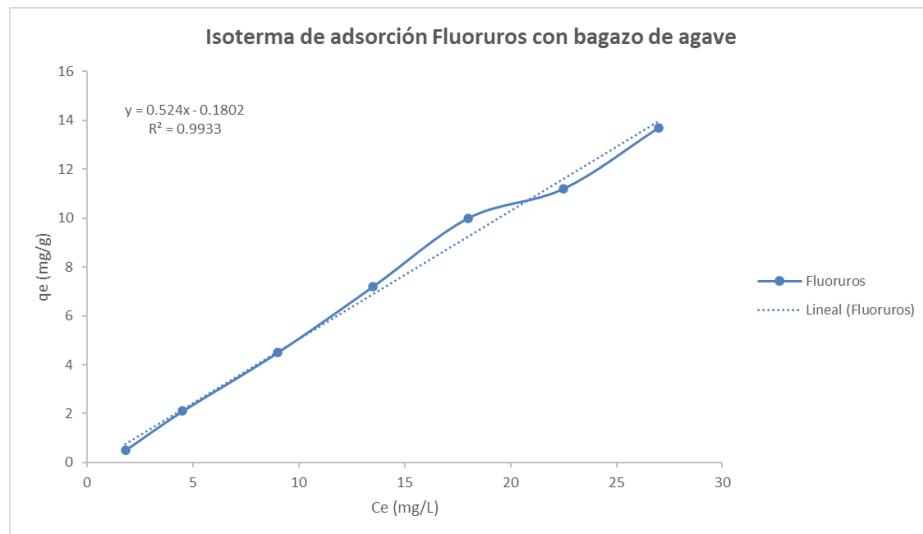


Figura 2. Isoterma de adsorción con los residuos de agave para la eliminación de flúor. Ce: concentración en equilibrio de la disolución; qe: cantidad de adsorbato por g de adsorbente.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el bagazo de agave activado es un bioadsorbente eficaz para la remoción de flúor en soluciones acuosas, alcanzando una capacidad máxima de adsorción de 13.7 mg/g. El modelo lineal obtenido evidencia un comportamiento proporcional entre la concentración de equilibrio y la cantidad adsorbida, lo que sugiere una adsorción predecible y favorable en condiciones controladas. La caracterización del material mediante espectroscopía FTIR reveló la presencia de grupos funcionales como hidroxilos, carboxilos y carbonilos, que favorecen la interacción con los iones flúor. Estos hallazgos posicionan al bagazo de agave no solo como un material eficiente, sino también como una opción sostenible y de bajo costo que promueve la valorización de residuos agroindustriales, especialmente en zonas productoras de mezcal y tequila. En conjunto, el presente trabajo contribuye al desarrollo de tecnologías accesibles para el tratamiento de agua contaminada y sienta las bases para investigaciones futuras orientadas a su escalamiento y aplicación en comunidades rurales afectadas por la contaminación por flúor.

Bibliografía/Referencias

- Instituto Nacional del Cáncer (2024). *Hoja informativa sobre el agua fluorada*.
<https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/mitos/hoja-informativa-agua-fluorada>
- Hossein, M., Rwiza, M. J., Nyanza, E. C., Bakari, R., Ripanda, A., Nkrumah, S., Selemani, J. R., & Machunda, R. L. (2023). *Fluoride contamination a silent global water crisis: A Case of Africa*. *Scientific African*, 26, e02485. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02485>
- Franco Mota, R. I., Rodriguez-Rosales, M. D. J., Martínez-Roldán, A. J., Martínez Gómez, V. J., De la Peña Arellano, A., & Contreras Hernández, M. G. (2022). El Agave en México: su aplicación como adsorbente para la remoción de contaminantes en el agua. *Revista Agraria*, 2(3), 5–14. <https://doi.org/10.59741/agraria.v2i3.623>
- Sierra, E., Alcaraz, J., Valdivia, Á., Rosas, A., Hernández, M., Vivaldo, E., & Martínez, A. (2019). Bagazo de agave: De desecho agroindustrial a materia prima en las biorrefinerías. *Ciencia UNAM*. Bagazo de agave: de desecho agroindustrial a materia prima en las biorrefinerías - Ciencia UNAM
- Martínez, M. E., López, L. A., & González, A. R. (2021). Evaluación de residuos lignocelulósicos como bioadsorbentes para aniones en agua. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20(2), 455–466.
- Rivera-Utrilla, J., Sánchez-Polo, M., Gómez-Serrano, V., Álvarez, P. M., Alvim-Ferraz, M. C. M. & Dias, J. M. (2019). Activated carbon modifications to enhance adsorption of emerging contaminants in water. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 241–258.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.033>
- Rojas-Mayorga, C. K., et al. (2022). Remoción de fluoruros con bioadsorbentes de bajo costo: una revisión. *Revista Colombiana de Química Aplicada*, 54(1), 33–41.