

Evaluación de la bioadsorción de Fluoruro con residuos agrícolas de la cáscara de tamarindo

Evaluation of fluoride bioadsorption with agricultural residues from tamarind shell

Karla Guadalupe Piñón Sánchez¹, David Tirado Torres¹, Eduardo Jahir Gutiérrez Alcántara², Adrián Zamorategui Molina¹,
Guadalupe Vázquez Rodríguez^{1*}

¹Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato-División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Av. Juárez No. 77 Col. Centro Guanajuato, Gto., México, C.P. 36250.

²Universidad Autónoma de Campeche, Av. Agustín Melgar S/N, Buena Vista, Campeche, C.P. 24039, México

*vazquez.g@ugto.mx

Resumen

En el presente estudio, se analizó la capacidad de adsorción de flúor a partir de la activación de cáscara de tamarindo utilizando una solución ácida de HCl 0.2M. La capacidad de adsorción de flúor fue evaluada en un rango de concentración de 2 - 30 mg/L. Las pruebas realizadas a pH neutro evidenciaron la capacidad máxima de adsorción de flúor. El análisis de espectroscopia IR corroboró que la adsorción de fluoruro es asociada a atracciones electrostáticas, intercambio iónico y fisisorción. Se concluye que la cáscara de tamarindo puede ser un material alternativo para la eliminación de fluoruro una vez que se logró adsorber 13.1 mg/g. La aplicación de esta metodología en agua de pozo involucra el análisis de las demás especies metálicas en solución y una posible interacción entre la composición química del agua y la naturaleza de la superficie de los residuos agrícolas.

Palabras clave: Flúor, adsorción, tamarindo.

1. Introducción

El agua es el elemento esencial para garantizar el sustento de la vida; más su contaminación ha aumentado significativamente en las últimas décadas, como es el caso de la contaminación de aguas subterráneas con flúor, fenómeno que suele estar relacionado además de la actividad industrial, con la composición geológica del suelo, la cual puede favorecer el incremento de su concentración, donde el consumo de agua cuyas concentraciones de flúor se encuentren sobre el límite permisible por las normatividades competentes está asociado como causa de problemas de salud, como lo son la fluorosis dental y ósea, así como una mayor susceptibilidad a enfermedades renales e inclusive cáncer (Reyes Navarrete et al., 2012). A la par la comunidad científica se ha esforzado por desarrollar y promover la implementación de métodos y procesos que permitan la remoción de agentes nocivos del agua en ambientes contaminados, generalmente en efluentes industriales; los procesos son: adsorción, precipitación, intercambio iónico, electrodeposición, coagulación-floculación, flotación y filtración con membranas (Sanchez-Silva et al., 2020) y aunque si bien estos métodos resultan ser una buena alternativa lo cierto es que resultan ser costosos, por lo cual se han buscado alternativas tanto accesibles a la economía nacional como eficaces siendo una alternativa viable la bioadsorción.

La bioadsorción se trata de un proceso de eliminación de contaminantes de soluciones acuosas, empleando biomasa viva o muerta, esto haciendo uso de residuos orgánicos como material adsorbente acorde a sus propiedades, mecanismos de adsorción y rendimiento, aunque claro este proceso se ve influenciado por la concentración inicial del metal, el tamaño de partícula, el pH y su propia composición, aunque como tal deben ser materiales bastante porosos, lo que les permite retener o atrapar en su interior partículas, átomos o iones. Algunos ejemplos de residuos agrícolas son: la cáscara de nuez, el bagazo de caña y los residuos de arroz, son ricos en compuestos con potencial adsorbente, como celulosa, hemicelulosa y lignina, que pueden interactuar eficazmente con contaminantes presentes en el agua (Jyotikusum, 2018, Farhadi, 2021). Investigaciones recientes han demostrado que estos residuos agrícolas pueden ser transformados en bioadsorbentes mediante procesos como la carbonización, la activación física y química, y la modificación con grupos funcionales que aumentan la capacidad de adsorción (Palić et al., 2021), sin embargo, en el presente trabajo hemos enfocado la aplicación de aquellos residuos agrícolas de carácter local y fácil adquisición. Un ejemplo de estos residuos es aquellos correspondientes a él tamarindo, abundantes en Guanajuato, se destaca la cáscara de tamarindo, compuesta en gran parte por carbohidratos (57,1%), proteína (13,3%) y agua (11,3%). La fracción proteica está formada mayoritariamente por ácidos glutámico y aspártico, glicina y leucina. Las proteínas, a su vez, se componen sobre todo de ácido glutámico y aspártico, glicina y leucina (Salgado Lozano, 2018).

2. Metodología

2.1 Pretratamiento

Para la obtención del bioadsorbente se realizó una recolección de residuos orgánicos, en este caso de residuos de Tamarindo en un mercado de la Ciudad de Guanajuato. Posteriormente se procedió con un lavado, descascarillado y despulpado manual para retirar residuos de pulpa. La cascara fue lavada con agua destilada y secada por 24 horas a temperatura ambiente y posteriormente en estufa a una temperatura de 70°C por 24 horas. Posteriormente se procedió con el molido por medio de un molino de café, licuadora industrial y tamizado a fin de obtener una harina con tamaño de partícula de 100 a 500 micras.

2.2 Activación de bioadsorbente

Tras la obtención de la harina, se procedió con su activación para lo cual se pesaron 120 g de harina de cáscara de tamarindo, determinado su equivalente en mililitros dado a que se adicionaría este mismo volumen de ácido clorhídrico (HCl) 0.2 M, esta activación química busca optimizar su capacidad de adsorción, introduciendo grupos funcionales ácidos en la superficie de las partículas, dado a que se conoce que la adsorción de los iones es atribuida a las interacciones electrostáticas entre los iones de las soluciones con los de la superficie del medio adsorbente (Rodríguez et al., s. f.), tras esto se llevaron a agitación durante 24 horas a 200 rpm. Una vez activada, la muestra fue filtrada y suspendida en agua desionizada, esto a fin de neutralizar su pH por medio de la adición de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M y así ser nuevamente deshidratada en una estufa a 70°C esto último por 48 horas y finalmente ser tamizada para garantizar el tamaño de partícula de 100 a 500 micras.

2.3 Soluciones Modelo

Se prepararon soluciones de flúor (F-) con las concentraciones de 2 - 30 mg/L cada una correspondientes a el rango de concentraciones típicas de este en aguas subterráneas contaminadas. Estas soluciones fueron aplicadas en los ensayos de adsorción.

2.4 Pruebas de adsorción

Este proceso siendo llevado a cabo en frascos agitados, para lo cual se prepararon 100 mL de solución acorde a las concentraciones previamente preparadas, añadiendo a cada una 0.1 g de bioadsorbente de cáscara de tamarindo una vez homogenizado, se ajustó el pH a 6.5, una vez culminado el protocolo para cada concentración se llevaron a agitación durante 22 horas a 200 rpm, y una temperatura ambiente de 22°C.

2.5 Análisis de concentraciones

Culminadas las pruebas de adsorción nuevamente se filtraron las muestras, conservando la fase acuosa en recipientes previamente esterilizados, para determinar la concentración del flúor mediante un medidor multiparamétrico Orion star A329 con electrodo de ion selectivo para fluoruros.

3. Resultados y discusiones

3.1 Caracterización por FTIR

El análisis espectroscópico por infrarrojo (FTIR) realizado a la cáscara de tamarindo activada químicamente (Figura 1) permitió identificar la presencia de grupos funcionales asociados con componentes orgánicos lignocelulósicos. Se observaron bandas en la región de 3313 cm^{-1} correspondientes al estiramiento del grupo hidroxilo ($-\text{OH}$), presentes en celulosa, hemicelulosa y pectinas, lo cual sugiere una superficie rica en sitios donadores de electrones útiles para la interacción con iones negativos como el fluoruro.

Estas señales confirman que el material posee una matriz funcional rica en oxígenos disponibles, que favorece mecanismos de adsorción por interacción electrostática, fisisorción y posible intercambio iónico con especies aniónicas (Yin et al., 2023; Rodríguez et al., s.f.). La banda comprendida entre 960 y 650 cm^{-1} corresponde a anómeros β de la celulosa, indicando una estructura polimérica estable que puede contribuir al soporte mecánico del adsorbente.

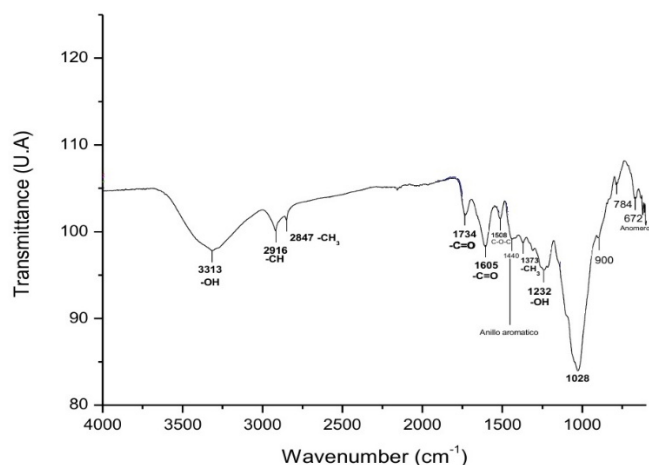


Figura 1. Espectro infrarrojo de cáscara de tamarindo.

Tabla 1. Bandas de absorción de IR en cáscara de tamarindo.

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Grupo funcional	Estiramiento	Compuesto
3313	Alcohol	O-H	Pectina, celulosa, azúcares, Lignina, hemicelulosa, polifenoles
2916, 2847	Alcano	C-H	Lignina, celulosa, hemicelulosa, catequina, ácido láctico.
1734, 1605	Carboxilo	C=	Pectina, hemicelulosa, lignina, proteína.
1440	Anillo aromático		Lignina, polifenoles.
196-650	Anómeros β		Celulosa

3.2 Isoterma de adsorción

La capacidad de adsorción de fluoruro fue evaluada mediante una serie de ensayos a diferentes concentraciones iniciales (2–30 mg/L), manteniendo constante la masa del adsorbente y el tiempo de contacto. Los resultados indicaron una relación directa entre la concentración de equilibrio (C_e) y la cantidad adsorbida por gramo de bioadsorbente (q_e), lo que sugiere un comportamiento lineal del sistema. La figura 2 muestra la curva de la isoterma obtenida, misma que se ajusta adecuadamente a un modelo lineal, con una ecuación obtenida de la forma $q_e = 0.53 C_e - 0.11$ y coeficiente de correlación (R^2) elevado. Estos resultados sugieren o cual indica que los sitios activos en la superficie del bioadsorbente son homogéneos y que la adsorción se desarrolla mayormente en monocapa.

El modelo obtenido puede expresarse como:

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

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

Donde K_H representa la constante de afinidad del adsorbente por el fluoruro.

El comportamiento indica que la adsorción de fluoruro en la cáscara de tamarindo activa sugiere un patrón proporcional a la concentración de equilibrio. En estos ensayos la capacidad máxima alcanzada fue de fluoruro fue de 13.1 mg/g. La capacidad de adsorción obtenida cercano a los resultados reportados con cáscara de naranja (10.8 mg/g) y residuos de té verde (11.5 mg/g) Singh et al., 2022; Sanchez-Silva et al., 2020.

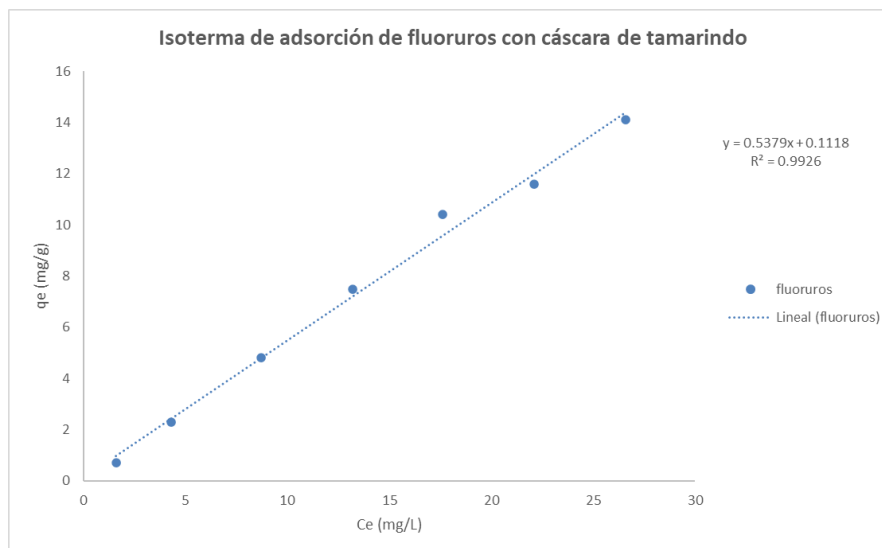


Figura 2. Isoterma de adsorción con cáscara de tamarindo para la eliminación de fluoruros. C_e : concentración en equilibrio de la disolución; q_e : cantidad de adsorbato por g de adsorbente.

Basado en la caracterización funcional y el comportamiento de la isoterma, se infiere que los mecanismos dominantes de retención del fluoruro en este sistema incluyen interacciones electrostáticas entre los grupos ácidos del adsorbente (como carboxilos y fenóles) y el ion F^- , así como posibles fenómenos de fisisorción superficial. Dado el tratamiento ácido previo, se presume un aumento en la densidad de carga positiva sobre la superficie del material, favoreciendo la atracción del anión fluoruro, lo cual ha sido confirmado en sistemas similares (Rodríguez et al., s.f.; Yin et al., 2023).

4. Conclusiones

Los resultados de este estudio evidencian que los residuos agrícolas de cáscara de tamarindo activados con ácido clorhídrico tienen una capacidad efectiva para adsorber iones fluoruro en soluciones acuosas. La caracterización funcional demostró la presencia de grupos $-OH$ y $-COOH$ que permiten una interacción favorable con el anión, y el comportamiento de la isoterma mostró una relación lineal directa entre C_e y q_e , sugiriendo una adsorción homogénea y eficiente en condiciones controladas. Estas características posicionan a este material como una alternativa viable, económica y sostenible para ser considerada en procesos de remoción de fluoruro en aguas subterráneas contaminadas, particularmente en comunidades rurales con recursos limitados.

5. Bibliografía/Referencias

- Reyes Navarrete, M. G., Alvarado de la Peña, A. I., Antuna, D. M., González-Valdez, L. S., Vázquez-Alarcón, E. C., & García-Vargas, A. (2012). Calidad en la determinación de fluoruros en agua de consumo humano. *Vidsupra*, 4(1), 17–19. <https://repositoriodigital.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/8841/1/divulg%20fluoruros%20env%202.pdf>
- Rodríguez, P., Giraldo, L., & Moreno, J. C. (2010). Influencia del pH sobre la adsorción en carbón activado de Cd(II) y Ni(II) desde soluciones acuosas. *Rev. Colomb. Quím.* 39(3) 401. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042010000300008
- Sanchez-Silva, J. M., González-Estrada, R. R., Blancas-Benitez, F. J., & Fonseca-Cantabrana, Á. (2020). *Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados*. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23, 1–18. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261>
- Jyotikusum, A., Upendra K. and P. Mahammed. (2018). Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater by Chemically Modified Agricultural Waste Material as Potential Adsorbent-A Review. *Int. J. of Current Eng. Techn.* 8(3)526. DOI: <https://doi.org/10.14741/iicet/v.8.3.6>
- Farhadi, A., Ameri, A., and Tamjidi S., (2021). Application of Agricultural Wastes as a Low-cost Adsorbent for Removal of Heavy Metals and Dyes from Wastewater: A Review Study. *Physical Chemistry Research* 9(2):211-226. DOI: [10.22036/pcr.2021.256683.1852](https://doi.org/10.22036/pcr.2021.256683.1852)
- Palić, N., Maia, A.S., Teodorovic, A., Et. Al. (2021). Bio-waste valorisation: Agricultural wastes as biosorbents for removal of (in)organic pollutants in wastewater treatment. *Chem. Eng. J. Adv.* (9)100239. DOI: [10.1016/j.cej.2021.100239](https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100239)
- Salgado Lozano, M. A. (2018). Evaluación de las semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante para la remoción de turbidez en aguas superficiales [Trabajo de grado, Universidad de Sucre]. Repositorio Institucional Universidad de Sucre. <https://repositorio.unisucre.edu.co/server/api/core/bitstreams/ca37dd80-d99c-446d-9878-79abaaa6d435/content>