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

Estudio de equilibrio de adsorción de flúor y Cromo VI sobre geopolímeros a base de cascarilla de arroz: Efecto de pH y Temperatura

Study of fluoride and chromium (VI) adsorption equilibrium on rice husk-based geopolymers: Effect of pH and temperature

Cecilia Estefani Torres González[1], Paloma Eloísa Ramírez Zúñiga[2,3], Jairo Francisco Juárez Vera[2], Araceli Jacobo Azuara[2*]

[1]Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías, Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica, Col. Lomas del Campestre, Lomas del Bosque No.103, C.P. 37150, León, Gto., México.
[2]Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Química, Col. Noria Alta s/n, C.P. 36050, Guanajuato, Gto., México.
[3]Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato, Carretera Guanajuato-Puentecillas km 10.5 Predio El Carmen, C.P. 36262 , Guanajuato, Gto., México.
*aazuara@ugto.mx

Resumen

El presente trabajo evalúa el equilibrio de adsorción de fluoruro y Cr(VI) en solución acuosa utilizando geopolímeros mesoporosos sintetizados a partir de cascarilla de arroz y metacaolín mediante activación alcalina con NaOH. Los estudios de adsorción se realizaron en sistemas discontinuos (batch), analizando el efecto del pH (5, 7 y 9) y de la temperatura (15, 25 y 35 °C) sobre la capacidad de adsorción del geopolimero. Para ello, 0.5 g de geopolímero se pusieron en contacto con soluciones acuosas de diferentes concentraciones iniciales de fluoruro y Cr (VI), manteniendo condiciones controladas durante siete días hasta alcanzar el equilibrio. Los datos experimentales obtenidos se utilizaron para construir las isotermas de adsorción y evaluar su ajuste a los modelos de Langmuir y Freundlich. Los resultados mostraron que la adsorción de fluoruro está fuertemente influenciada por el pH de la solución, alcanzándose la máxima capacidad de adsorción a pH 5. Este comportamiento se atribuye a la disminución de la repulsión electrostática entre los aniones fluoruro y la superficie del geopolímero en condiciones más ácidas. En contraste, la adsorción de Cr (VI) presentó su mayor capacidad a pH neutro, donde predominan las especies cromato e hidrogenocromato, las cuales exhiben una mayor afinidad por los sitios activos del material adsorbente. La temperatura también mostró un efecto significativo sobre el proceso de adsorción. Para el fluoruro, la capacidad de adsorción disminuyó al aumentar la temperatura, lo que sugiere un proceso de naturaleza exotérmica. Por el contrario, la adsorción de Cr (VI) se vio favorecida por el incremento de la temperatura, indicando un comportamiento endotérmico asociado a una mayor difusión y estabilización de las especies adsorbidas sobre la matriz geopolimérica. Asimismo, el análisis de las isotermas reveló que el modelo de Freundlich proporciona el mejor ajuste para ambos contaminantes, evidenciando la naturaleza heterogénea de la superficie del geopolímero y la presencia de sitios activos con diferentes energías de adsorción. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de los geopolímeros a base de cascarilla de arroz como materiales adsorbentes sustentables para la remoción de fluoruro y cromo hexavalente en sistemas acuosos.

Palabras clave: geopolímeros; cascarilla de arroz; isotermas de adsorción.

Introducción

La contaminación de los recursos hídricos por compuestos inorgánicos tóxicos representa uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI. El crecimiento demográfico, la expansión de las actividades industriales y el incremento en la generación de efluentes han favorecido la acumulación de contaminantes persistentes en cuerpos de agua superficiales y subterráneos, comprometiendo tanto la salud humana como

la integridad de los ecosistemas acuáticos (Liu *et al*., 2019; Mitra *et al*., 2019). En este contexto, el desarrollo de tecnologías eficientes, sostenibles y económicamente viables para la remoción de contaminantes constituye una prioridad para garantizar la disponibilidad de agua segura y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con agua limpia y saneamiento.

Entre los contaminantes inorgánicos de mayor preocupación se encuentra el cromo hexavalente [Cr(VI)], un elemento ampliamente utilizado en procesos industriales como la galvanoplastia, la fabricación de pigmentos, el curtido de pieles, la minería y la metalurgia (Mitra *et al*., 2019; Qiu *et al*., 2017). Debido a su alta solubilidad y movilidad en medios acuosos, el Cr(VI) puede dispersarse fácilmente en el ambiente y alcanzar fuentes de abastecimiento de agua. A diferencia del cromo trivalente [Cr(III)], el Cr(VI) presenta una elevada toxicidad y ha sido clasificado como carcinógeno para los seres humanos, ya que puede inducir estrés oxidativo, alteraciones genéticas y daños en distintos órganos tras exposiciones prolongadas (Qiu *et al*., 2017). Otro contaminante de relevancia ambiental es el fluoruro (F^-). Aunque en bajas concentraciones contribuye a la salud dental, concentraciones superiores a los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud pueden ocasionar fluorosis dental y esquelética, así como otros efectos adversos asociados con la exposición crónica (Habuda-Stanić *et al*., 2014). En diversas regiones del mundo, incluido México, la presencia natural de fluoruro en aguas subterráneas y las descargas industriales han incrementado la necesidad de desarrollar materiales adsorbentes capaces de reducir su concentración hasta niveles compatibles con las normas de calidad para agua potable.

Las tecnologías convencionales utilizadas para la eliminación de estos contaminantes incluyen precipitación química, intercambio iónico, coagulación-floculación, procesos de membrana y tratamientos electroquímicos. Sin embargo, muchas de estas alternativas presentan limitaciones relacionadas con altos costos de operación, elevado consumo energético, complejidad operativa o generación de residuos secundarios que requieren manejo posterior (Duan *et al*., 2020; Mitra *et al*., 2019). En contraste, la adsorción se ha consolidado como una de las tecnologías más prometedoras debido a su simplicidad, alta eficiencia, facilidad de diseño y potencial de regeneración del adsorbente (Duan *et al*., 2020; Qiu *et al*., 2017).

En años recientes, la valorización de residuos agroindustriales para la producción de adsorbentes ha cobrado especial interés bajo los principios de la economía circular. Entre los materiales desarrollados destacan los geopolímeros, compuestos obtenidos mediante la activación alcalina de precursores ricos en sílice y alúmina que generan una red tridimensional de aluminosilicatos con elevada estabilidad química, resistencia mecánica y capacidad de adsorción (Davidovits, 2020; Wang *et al*., 2024). La estructura de estos materiales proporciona sitios activos capaces de interactuar con especies contaminantes mediante mecanismos de adsorción superficial, intercambio iónico y complejación.

La cascarilla de arroz constituye una materia prima particularmente atractiva para la síntesis de geopolímeros debido a su amplia disponibilidad, bajo costo y elevado contenido de sílice amorfa después de un tratamiento térmico adecuado. Su aprovechamiento permite transformar un residuo agrícola en un material de alto valor agregado, reduciendo simultáneamente los problemas ambientales asociados a su disposición final. Diversos estudios han demostrado que los geopolímeros obtenidos a partir de cenizas de cascarilla de arroz presentan estructuras porosas, alta estabilidad fisicoquímica y abundancia de grupos funcionales superficiales que favorecen la adsorción de contaminantes presentes en solución acuosa (Ruiz Molina, 2017; Villamor Lora, 2016). Asimismo, parámetros como la relación Si/Al, las condiciones de activación alcalina y el proceso de curado influyen significativamente en las propiedades texturales y en la disponibilidad de sitios activos del material (Davidovits, 2020; Wang *et al*., 2024).

La evaluación del desempeño de un adsorbente requiere estudiar las variables que controlan el proceso de adsorción. Entre ellas, el pH y la temperatura desempeñan un papel fundamental debido a que modifican la especiación química de los contaminantes, la carga superficial del adsorbente y la energía de interacción entre adsorbente y adsorbato. Por ello, los estudios de equilibrio de adsorción constituyen una herramienta indispensable para comprender los mecanismos de remoción y cuantificar la capacidad adsorbente del material.

Las isotermas de adsorción permiten describir la distribución del contaminante entre la fase líquida y la fase sólida una vez alcanzado el equilibrio. Modelos ampliamente utilizados como Langmuir y Freundlich proporcionan información sobre la naturaleza de la superficie adsorbente, la homogeneidad de los sitios activos y la afinidad entre el adsorbente y el adsorbato (Liu *et al*., 2019; Mužek *et al*., 2014; Qiu *et al*., 2017). El análisis de estos modelos resulta esencial para establecer las condiciones de operación más favorables y generar parámetros útiles para el diseño de sistemas de tratamiento de agua.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Aunque diversos trabajos han demostrado el potencial de los geopolímeros para la remoción de contaminantes inorgánicos, la mayoría de las investigaciones se han enfocado en materiales sintetizados a partir de cenizas volantes o metacaolín. En contraste, existe información limitada acerca del comportamiento de geopolímeros obtenidos a partir de cascarilla de arroz para la adsorción de fluoruro y cromo hexavalente, particularmente en relación con el efecto combinado del pH y la temperatura sobre el equilibrio de adsorción.

Con base en la metodología propuesta por Aguilar-Martínez *et al*. (2025), que comprende el pretratamiento ácido de la cascarilla de arroz, la obtención de sílice de alta pureza mediante calcinación y la posterior activación alcalina para la síntesis del geopolímero, el presente proyecto se orienta al estudio de las isotermas de equilibrio de adsorción de fluoruro y Cr(VI) en sistemas discontinuos. Los resultados permitirán comprender la interacción entre los contaminantes y el material adsorbente, establecer las condiciones óptimas de operación y aportar información relevante para el desarrollo de tecnologías sostenibles destinadas a la remediación de aguas contaminadas.

El objetivo general de este proyecto es evaluar el equilibrio de adsorción de fluoruro (F^-) y cromo hexavalente [Cr(VI)] sobre geopolímeros sintetizados a partir de cascarilla de arroz, determinando la influencia del pH y la temperatura sobre la capacidad de adsorción y los parámetros de las isotermas de equilibrio, con la finalidad de identificar las condiciones óptimas de remoción y contribuir al desarrollo de materiales adsorbentes sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas.

Metodología

Síntesis del geopolímero a base de cascarilla de arroz

El geopolímero mesoporoso a base de cascarilla de arroz empleado como material adsorbente fue sintetizado con la siguiente metodología (ver Ilustración 1). Se utilizaron como precursores metacaolín y cascarilla de arroz como fuente de sílice que fueron activadas con una solución alcalina de NaOH 1.0 N, la mezcla obtenida se puso en moldes de silicón con forma de cubos de 1 cm x 1 cm y se metieron a un microondas para realizar el proceso de curado y obtener los geopolímeros mesoporosos.

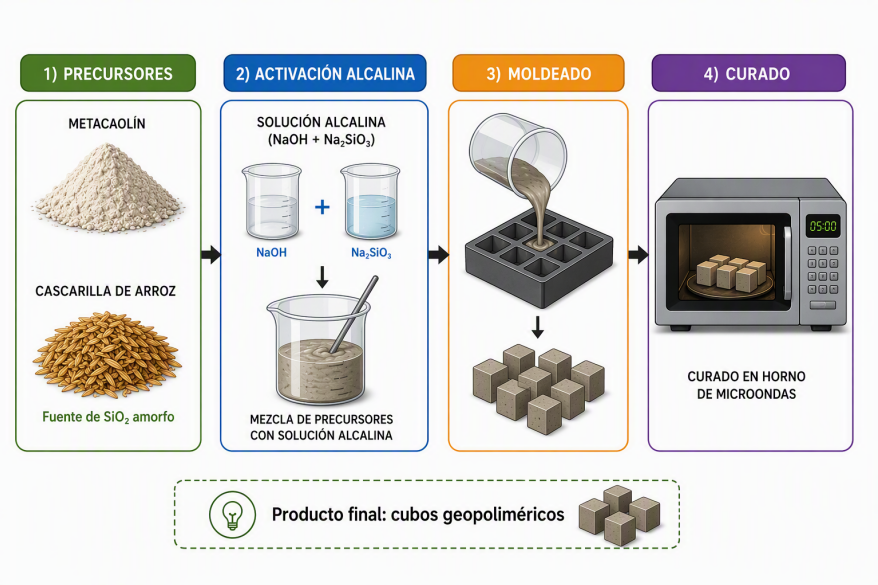


Ilustración 1. Secuencia de la síntesis de geopolímero utilizando cascarilla de arroz. Imagen generada con Microsoft Copilot (IA generativa) a partir de una descripción elaborada por los autores. La imagen fue utilizada únicamente con fines ilustrativos.

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

Estudios de equilibrio de adsorción

Los experimentos de equilibrio de adsorción se realizaron mediante pruebas en lote (batch) a pH y temperatura constante (ver Ilustración 2). Para cada experimento se colocó una masa de 0.5 g de geopolímero en tubos cornic de 50 mL con 40 mL de solución estándar del contaminante a diferentes concentraciones de fluoruro o de Cromo (VI). Posteriormente, se ajustó el pH inicial de las soluciones a tres valores diferentes: 5, 7 y 9 utilizando soluciones de HNO_3 y HCl 0.1 N. Las muestras permanecieron en contacto durante un periodo de siete días, tiempo durante el cual se mantuvieron en agitación constante para favorecer el equilibrio entre la fase líquida y el adsorbente. Durante los siete días de experimentación se realizó diariamente la verificación y ajuste del pH de cada muestra para asegurar que permaneciera constante durante todo el experimento. Al finalizar el tiempo de contacto se determinó la concentración final del contaminante con el fin de calcular la cantidad adsorbida por el geopolímero y obtener las isotermas de adsorción. La concentración en equilibrio de Flúor se determinó utilizando un electrodo de ion selectivo y una solución de TISAB II para estabilizar la especie iónica del Flúor. Para el caso del Cromo VI se utilizó método de la difenilcarbazida que se basa en la formación de un complejo color violeta en medio ácido y se mide en un espectreofotometro de Uv-Visible. También se realizaron pruebas de equilibrio de adsorción a Temperatura de 15 °C, 25 °C y 35 °C y a un pH de 5, con el fin de determinar si el proceso de adsorción es de tipo físico o químico.

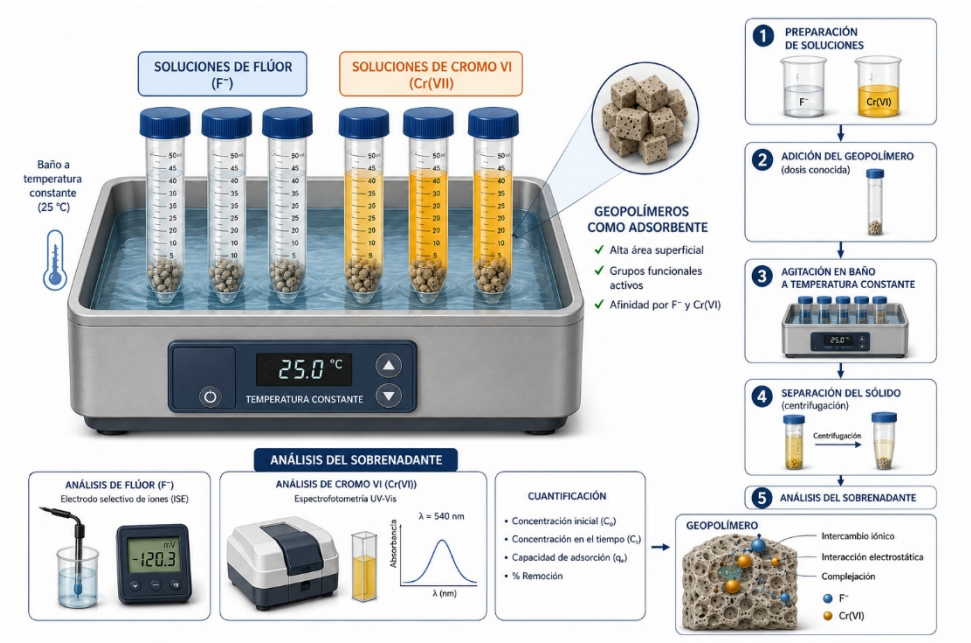


Ilustración 2. Sistema Batch para los experimentos de equilibrio de adsorción. Imagen generada con ChatGPT (IA generativa) a partir de una descripción elaborada por los autores. La imagen fue utilizada únicamente con fines ilustrativos.

Resultados

Efecto de pH

Los resultados de equilibrio de adsorción de flúor y Cromo VI en solución acuosa para evaluar el efecto del pH en la capacidad de adsorción del geopolímero se muestran en la Figura 1 y Figura 2 para el Flúor y Cromo VI, respectivamente. Se observa que la masa adsorbida de Flúor por gramo de adsorbente aumenta al disminuir el pH de la solución de 9 a 5, esto se debe a que a pH mayormente alcalinos la superficie del geopolímero es mayormente negativa, ocasionando una repulsión electrostática con los iones de fluoruro libre (F-). En el caso del Cromo VI se observa que ha concentraciones en el equilibrio menores de 20 mg/L no hay un efecto del pH en la capacidad de adsorción del geopolímero. Sin embargo, al aumentar la

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

concentración la masa adsorbida sobre la superficie del adsorbente va aumentando conforme aumenta el pH de 5 a 7 debido a la presencia del ion cromato, también se observa que la máxima capacidad de adsorción se obtiene a un pH neutro donde se tiene la presencia de la especie de CrO_4^{2-} y de $HCrO_4^-$, es probable que exista mayor afinidad del ion cromato (CrO_4^{2-}) y el geopolímero, que por el resto de las especies presentes.

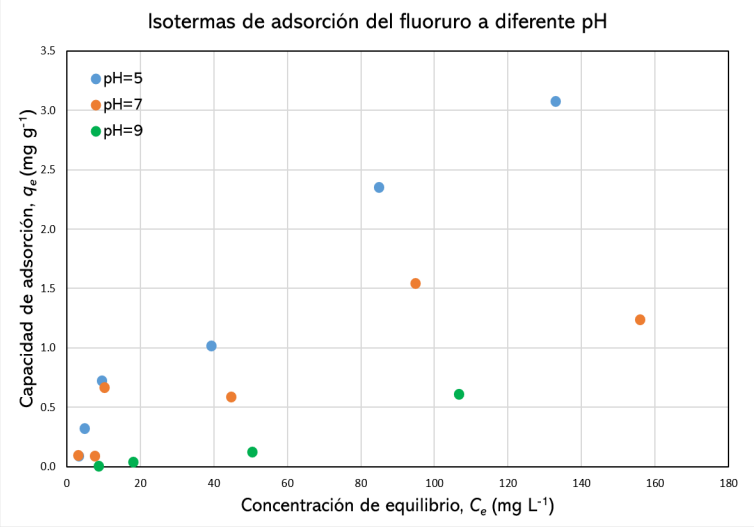


Figura 1. Isotermas de equilibrio de adsorción de fluoruro sobre geopolímeros a T=25°C y diferente pH (5,7 y 9).

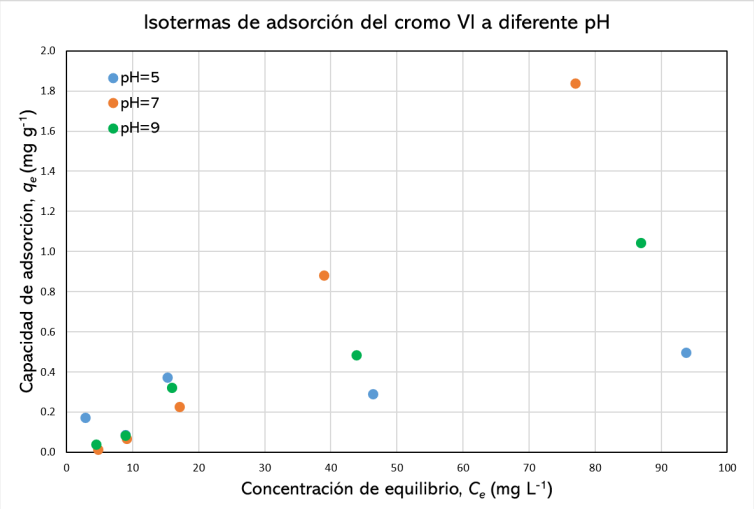


Figura 2. Isotermas de equilibrio de adsorción del cromo VI sobre geopolímeros a T=25°C y diferente pH (5,7 y 9).

Efecto de la Temperatura

En las Figuras3 y 4 se muestran los resultados del efecto de la temperatura en el equilibrio de adsorción de Flúor y Cromo VI, respectivamente. Los experimentos se realizaron a temperaturas de 15 °C, 25 °C y 35 °C y a un pH de 5 para ambos adsorbatos. Se observa que para el caso del Flúor la máxima capacidad se presenta a una temperatura de 15 °C, para una concentración en el equilibrio de 40 mg/L el incremento fue de 6 veces más con respecto a una temperatura de 25 °C. Esto se debe a que al tener un aumento de la

temperatura se reduce la estabilidad de los complejos superficiales formados entre el fluoruro y los grupos aluminol y silanol presentes en la matriz geopolimérica, favoreciendo los fenómenos de desorción. Este tipo de comportamiento sugiere un proceso exotérmico de adsorción.

Para el caso del Cromo VI se observa un efecto contrario, la capacidad de adsorción del geopolímero disminuye al aumentar la temperatura de 15 °C a 25 o 35 °C, para una concentración en el equilibrio de 40 mg/L hay un incremento de 7 veces la capacidad de adsorción al aumentar la temperatura, lo que sugiere que el proceso posee un carácter endotérmico. La elevación de la temperatura favorece la difusión de las especies cromato y dicromato hacia los sitios activos de la matriz geopolimérica, facilita la deshidratación de los aniones y promueve la formación de complejos superficiales más estables.

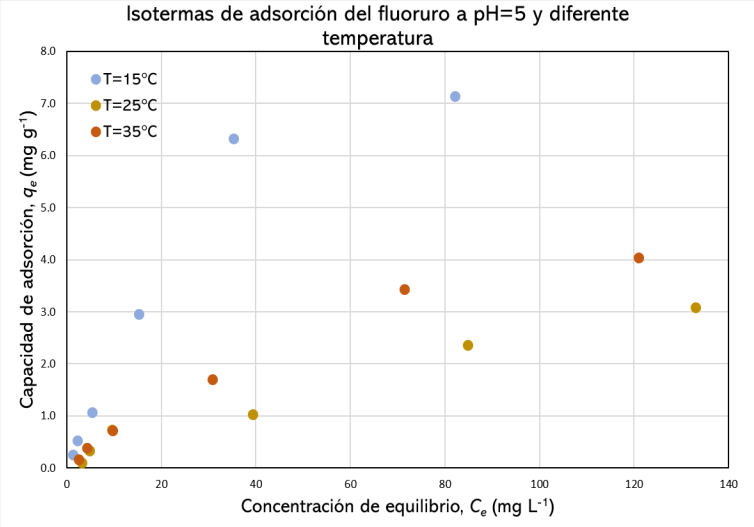


Figura 3. Isotermas de equilibrio de adsorción de fluoruro sobre geopolímeros a pH=5 y diferente temperatura (15, 25 y 35°C).

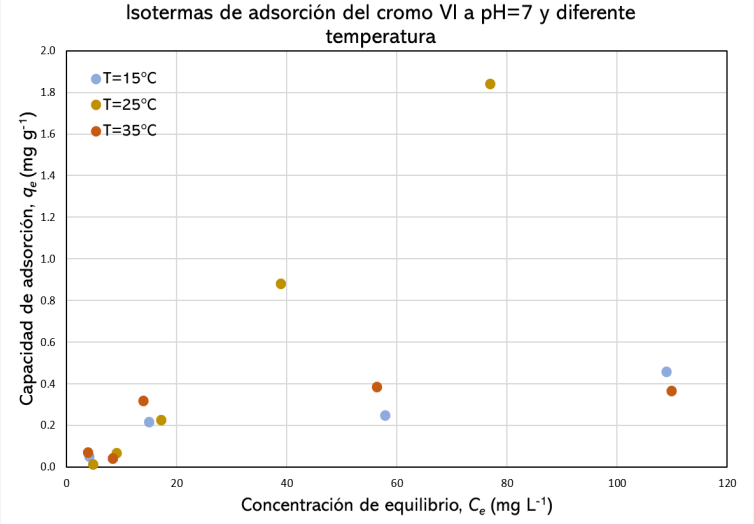


Figura 4. Isotermas de equilibrio de adsorción de cromo VI sobre geopolímeros a pH=7 y diferente temperatura (15, 25 y 35°C).

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

Modelos de isoterma de adsorción

Los datos experimentales de equilibrio de adsorción de Flúor y Cromo VI sobre el geopolímero fueron interpretados con los modelos de adsorción de Langmuir y Freundlich para evaluar el equilibrio entre la cantidad de soluto adsorbida en la superficie del adsorbente y su concentración en la fase líquida a temperatura constante. La interpretación con estos modelos es importante para determinar si el proceso está dominado por una adsorción en monocapa y sitios equivalentes (Langmuir) o por una superficie heterogénea con múltiples energías de adsorción (Freundlich). En las Figuras 5 y 6 se muestran el ajusto no lineal de cada uno de los modelos de adsorción para el Flúor y Cromo VI, respectivamente. En ambos casos se observa una mejor correlación de los datos experimentales del equilibrio de adsorción mediante el modelo de Freudlich, lo que indicaría una superficie heterogénea del geopolímero.

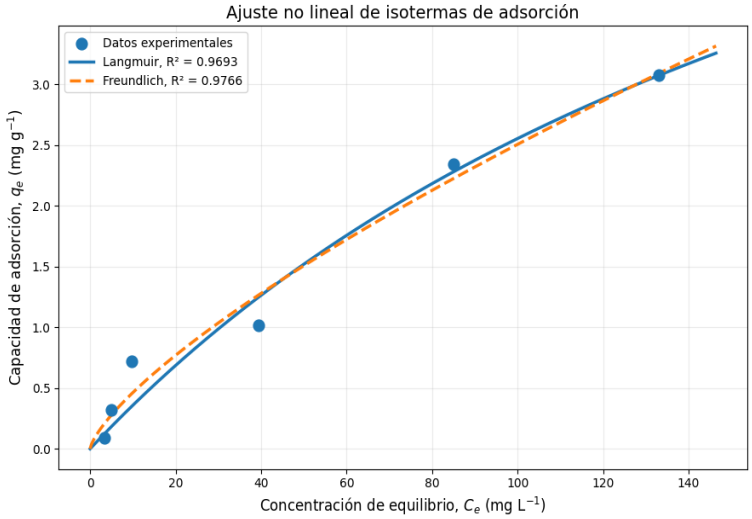


Figura 5. Interpretación de la isoterma de adsorción del fluoruro (pH=5 y T=25°C) con los modelos de Langmuir y Freundlich.

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

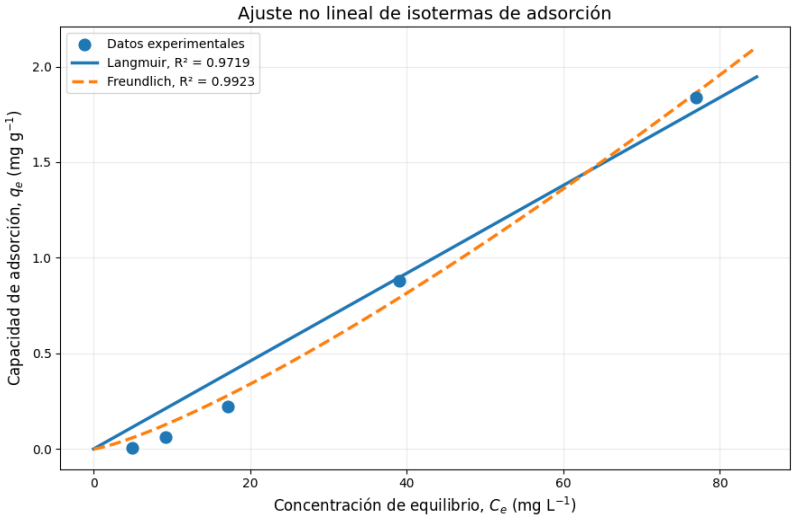


Figura 6. Interpretación de la isoterma de adsorción de Cromo VI (pH=7 y T=25°C) con los modelos de Langmuir y Freundlich.

Conclusión

Los geopolímeros sintetizados a partir de cascarilla de arroz demostraron ser materiales adsorbentes efectivos para la remoción de fluoruro y cromo hexavalente en soluciones acuosas

El pH influye significativamente en el proceso de adsorción. La máxima adsorción de fluoruro se obtuvo a pH 5, mientras que la de Cr (VI) se alcanzó a pH cercano a 7, evidenciando que la especiación de los contaminantes y la carga superficial del adsorbente controlan la interacción adsorbente-adsorbato.La adsorción de fluoruro disminuyó al incrementarse la temperatura, indicando un proceso exotérmico, mientras que la adsorción de Cr (VI) aumentó con la temperatura, sugiriendo un comportamiento endotérmico.

El modelo de Freundlich describió mejor las isotermas de adsorción de ambos contaminantes en comparación con el modelo de Langmuir, lo que evidencia la naturaleza heterogénea de la superficie del geopolímero y la existencia de múltiples tipos de sitios activos.

Los resultados respaldan el aprovechamiento de la cascarilla de arroz como materia prima para la producción de adsorbentes de valor agregado, promoviendo estrategias de economía circular y el desarrollo de tecnologías sostenibles para la remediación de aguas contaminadas. Las condiciones óptimas identificadas fueron pH 5 y baja temperatura para la adsorción de fluoruro, y pH 7 con temperaturas más elevadas para la adsorción de Cr (VI).

Referencias

Aguilar Martínez, S. J., Ramírez Zúñiga, P. E., Juárez-Vera, J. F., & Jacobo-Azuara, A. (2025). Síntesis de geopolímeros a base de cascarilla de arroz para su aplicación en adsorción de contaminantes en agua. En Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2025". Universidad de Guanajuato. ISSN 2007-672X.

Bernal-Silva, E. C., Campos-Bustos, E., Nava-Martínez, J., Ramírez Zúñiga, P., & Jacobo-Azuara, A. (2025). Adsorbentes sustentables de bajo costo para la remoción de contaminantes tóxicos en agua. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, *37*, 1-4. https://doi.org/10.15174/jc.2025.4766

Davidovits, J. (2020). *Geopolymer chemistry and applications* (5th ed.). Geopolymer Institute. ISBN: 9782954453118.

Duan, C., Ma, T., Wang, J., & Zhou, Y. (2020). Removal of heavy metal removal from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review. *Journal of Water Process Engineering,* 37, 101339. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339

Gonçalves, N. P. F., Almeida, M. M., Labrincha, J. A., & Novais, R. M. (2024). Efficient acid mine drainage remediation in fixed-bed column using porous red mud/fly ash geopolymer spheres. *Science of the Total Environment*, 940, 173633. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173633

Habuda-Stanić, M., Ravančić, M. E., & Flanagan, A. (2014). A review on adsorption of fluoride from aqueous solution. *Materials*, 7(9), 6317–6366. https://doi.org/10.3390/ma7096317

Liu, X., Ma, R., Wang, X., Ma, Y., Yang, Y., Zhuang, L., Zhang, S., Jehan, R., Chen, J., & Wang, X. (2019). Graphene oxide-based materials for efficient removal of heavy metal ions from aqueous solution: A review. *Environmental Pollution*, 252, 62–73. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.050

Mitra, T., Bar, N., & Das, S. K. (2019). Rice husk, an eco-friendly adsorbent for the removal of Pb(II) and Cr(VI) from aqueous solution: Batch and column studies with GA–NN modelling. *SN Applied Sciences*, 1, 486.

Mužek, M. N., Svilović, S., & Zelić, J. (2014). Fly ash-based geopolymeric adsorbent for copper ion removal from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 52(13–15), 2519–2526.

Qiu, J., Zhao, Y., Xing, J., & Sun, X. (2017). Fly ash-based geopolymer as a potential adsorbent for Cr(VI) removal. *Desalination and Water Treatment*, 70, 201–209.

Ruiz Molina, S. (2017). Preparación y caracterización de geopolímeros empleando como materia prima cenizas de cáscara de arroz [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Jaén].

Villamor Lora, Á. (2016). Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla].

Wang, R., Zhang, W., Ye, J., Wang, J., & Peng, X. (2024). Experimental synthesis of geopolymer adsorbent based on molecular dynamics simulation and adsorption mechanism of uranium in different channel sizes. *Journal of Molecular Liquids*, 408, 125324. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125324