

Remoción de Cd(II) en agua mediante carbonizado de huesos de pez diablo (Loricariidae) modificado químicamente

Removal of Cd(II) from water using chemically modified bone char from devil fish bones (Loricariidae)

Nahum A. Medellín-Castillo^{1,*}, Alfredo I. Flores-Rojas^{1,*}, Hilda G. Cisneros-Ontiveros², Alejandra Rojas-Frias², Amado E. Navarro-Frómata³, Joana Maia-Dias⁴

(1) Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria, 78290 San Luis Potosí, México

(2) Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava 201, Zona Universitaria, 78210 San Luis Potosí, S.L.P., México

(3) Departamento de Tecnología Alimentaria y Ambiental, Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, de Reforma 168, Campestre La Paz, Izúcar de Matamoros, 74420, México

(4) LEPABE - Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

*autor de correspondencia (nahum.medellin@uaslp.mx; alfredo.rojas@uaslp.mx)

Recibido 15/10/2025

Evaluado 18/01/2026

Aceptado 15/03/2026

<https://doi.org/10.65093/aci.v17.n1.2026.46>

RESUMEN

El pez diablo (familia Loricariidae) es una especie invasora que se ha dispersado en cuerpos de agua de diversos países, donde, debido a sus características morfológicas, fisiológicas y comportamentales, ha generado graves impactos económicos, sociales y ambientales. Ante esta problemática, resulta necesario prevenir su dispersión y establecer estrategias de manejo, control y erradicación mediante alternativas para su aprovechamiento. En este estudio se evaluó la eficacia de un carbonizado sintetizado a partir de huesos de pez diablo, modificado con NaNO_3 , para la remoción de Cd(II) en solución acuosa a pH 7 y 25 °C, mediante experimentos en lote. El carbonizado modificado presentó una máxima capacidad de adsorción de 46.9 mg g⁻¹. Estos resultados evidencian el potencial aprovechamiento de los huesos de pez diablo como una alternativa para mitigar los efectos negativos asociados a esta especie invasora.

Palabras clave: adsorción, metales pesados, biomasa, pez diablo (*Loricariidae*)

ABSTRACT

The devil fish (Loricariidae family) is an invasive species that has spread across water bodies in several countries, where, due to its morphological, physiological, and behavioral characteristics, it has caused significant economic, social, and environmental impacts. In response to this problem, it is necessary to prevent its dispersion and to establish management, control, and eradication strategies through alternative uses of this species. In this study, the effectiveness of a bone char synthesized from devil fish bones and chemically modified with NaNO_3 was evaluated for Cd(II) removal from aqueous solution at pH 7 and 25 °C using batch experiments. The modified bone char exhibited a maximum adsorption capacity of 46.9 mg g⁻¹. These results demonstrate the potential use of devil fish bones as an alternative strategy to mitigate the negative effects associated with this invasive species.

Keywords: adsorption, heavy metals, biomass, devil fish (*Loricariidae*)

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los recursos hídricos constituye en la actualidad una problemática grave a nivel mundial, con importantes repercusiones sociales, económicas y ambientales. Este fenómeno es consecuencia, principalmente, del crecimiento poblacional y del incremento de actividades antropogénicas orientadas al desarrollo y a la satisfacción de las necesidades de la sociedad, tales como la expansión industrial, la minería, la intensificación de la producción agrícola y la inadecuada disposición final de residuos (Mansour *et al.*, 2018; Schweitzer & Noblet, 2018). Estas actividades han provocado la incorporación de diversos contaminantes en cuerpos de agua superficiales y subterráneos, afectando tanto la calidad del recurso hídrico como el equilibrio de los ecosistemas acuáticos (Boyd, 2020). La contaminación del agua genera repercusiones sobre la biodiversidad, al alterar la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, y además limita la disponibilidad de agua segura para el consumo humano y otros usos esenciales (Abiye & Bhattacharya, 2019).

Los metales pesados son contaminantes presentes en el agua que generan gran preocupación debido a su elevada toxicidad, persistencia en el ambiente y capacidad de bioacumulación. Entre ellos, el cadmio (Cd(II)) se encuentra comúnmente en cuerpos de agua, principalmente como resultado de descargas industriales, actividades mineras y el uso de fertilizantes fosfatados (Yuan *et al.*, 2019). La Organización Mundial de la Salud establece un límite máximo permisible de Cd(II) en agua para consumo humano de 0.003 mg L^{-1} ($3 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$) (WHO, 2022). La exposición crónica a este metal, incluso a bajas concentraciones, se ha asociado con efectos adversos en la salud humana, tales como daño renal, alteraciones óseas y potencial carcinogenicidad (Hu *et al.*, 2024; Rahimzadeh *et al.*, 2017), lo que justifica la necesidad de desarrollar materiales y tecnologías eficientes para su remoción del agua.

Bajo este escenario, la adsorción se posiciona como una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, debido a su simplicidad operativa, alta eficiencia y viabilidad económica (Bonilla-Petriciolet *et al.*, 2017). Convencionalmente, se han empleado diversos adsorbentes comerciales, tales como el carbón activado, zeolitas, arcillas, biopolímeros, cenizas de residuos industriales, carbonizados de hueso y materiales modificados física y químicamente (Jadaa, 2024; Mubarak *et al.*, 2026; Pei *et al.*, 2024; Şimşek, 2025). Respecto a estos últimos, la modificación química actúa directamente sobre la superficie del adsorbente mediante la introducción de grupos funcionales y el aumento del área específica, mientras que la modificación física mejora la porosidad, la densidad y la solubilidad del material (Juela, 2022; Kanwal *et al.*, 2023). Así mismo, en los últimos años se ha intensificado la búsqueda de materias primas alternativas provenientes de fuentes más sostenibles y de bajo impacto ambiental. El uso de biomásas como materia prima para el desarrollo de materiales adsorbentes ha despertado interés como una estrategia atractiva, al permitir el aprovechamiento de recursos renovables, abundantes y de bajo costo, muchos de los cuales son considerados residuos o subproductos. En este sentido, la valorización de biomásas no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también se alinea con los principios de la economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

De manera particular, el aprovechamiento de biomásas provenientes de especies exóticas invasoras representa una estrategia innovadora y poco explorada para su manejo ambiental, al integrar acciones de control con la generación de productos con valor agregado (Fernández *et al.*, 2024). Una especie exótica invasora se define como aquella que se establece fuera de su área de distribución natural y que representa una amenaza para la biodiversidad nativa, el funcionamiento de los ecosistemas, la economía y la salud humana (Havel *et al.*, 2015). El pez diablo (familia Loricariidae) es una especie invasora originaria de la cuenca del río Amazonas y ha sido introducida en diversos cuerpos de agua a nivel mundial, principalmente por actividades humanas, generando graves afectaciones ambientales debido a su fácil adaptación biológica, la ausencia de depredadores naturales y la limitada existencia de alternativas para su aprovechamiento (Kumar *et al.*, 2018). Estudios previos han demostrado la eficacia del carbonizado de hueso de pez diablo en la remoción de diversos contaminantes. Específicamente, estos carbonizados han mostrado capacidad para adsorber As(V) y F^- (Cruz-Briano *et al.*, 2023), así como triclosán y Cd(II) (Cisneros-Ontiveros *et al.*, 2024). La valorización de la biomasa ósea de pez diablo permite mitigar los impactos asociados a su proliferación y, simultáneamente, desarrollar soluciones sostenibles para el tratamiento de agua. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y evaluar un carbonizado a partir de hueso de pez diablo, así como su modificación química, para la remoción de Cd(II) en solución acuosa, además de caracterizar sus propiedades morfológicas y sus grupos funcionales para

proponer los posibles mecanismos de adsorción de Cd(II), como una estrategia de manejo ambiental de una especie acuática invasora.

Análisis bibliométrico

Un análisis bibliométrico se caracteriza por explorar el crecimiento y la evolución de un área de investigación específica. Su objetivo principal es identificar patrones en la producción científica mediante un análisis cuantitativo de las publicaciones (Hassan *et al.*, 2020). En este trabajo, se realizó un análisis bibliométrico a partir de una búsqueda en la base de datos Web of Science (WoS), utilizando las palabras clave “*adsorption*”, “*biomass*”, “*heavy metals*” y “*valorization*”.

La búsqueda en WoS arrojó un total de 209 registros. El análisis por año de publicación (Fig. 1a) muestra una tendencia creciente en las investigaciones relacionadas con la adsorción de metales pesados empleando biomasa y estrategias de valorización. Durante el periodo inicial (2012-2017), el número de publicaciones reducido y esporádico sugiere que esta área temática se encontraba en una fase exploratoria. A partir de 2018 se observa un incremento, que se intensifica a partir de 2020. El mayor número de publicaciones se registró en 2025, con aproximadamente el 30 % del total de los datos analizados, lo que confirma que este campo de investigación actualmente se encuentra en una etapa de consolidación y crecimiento.

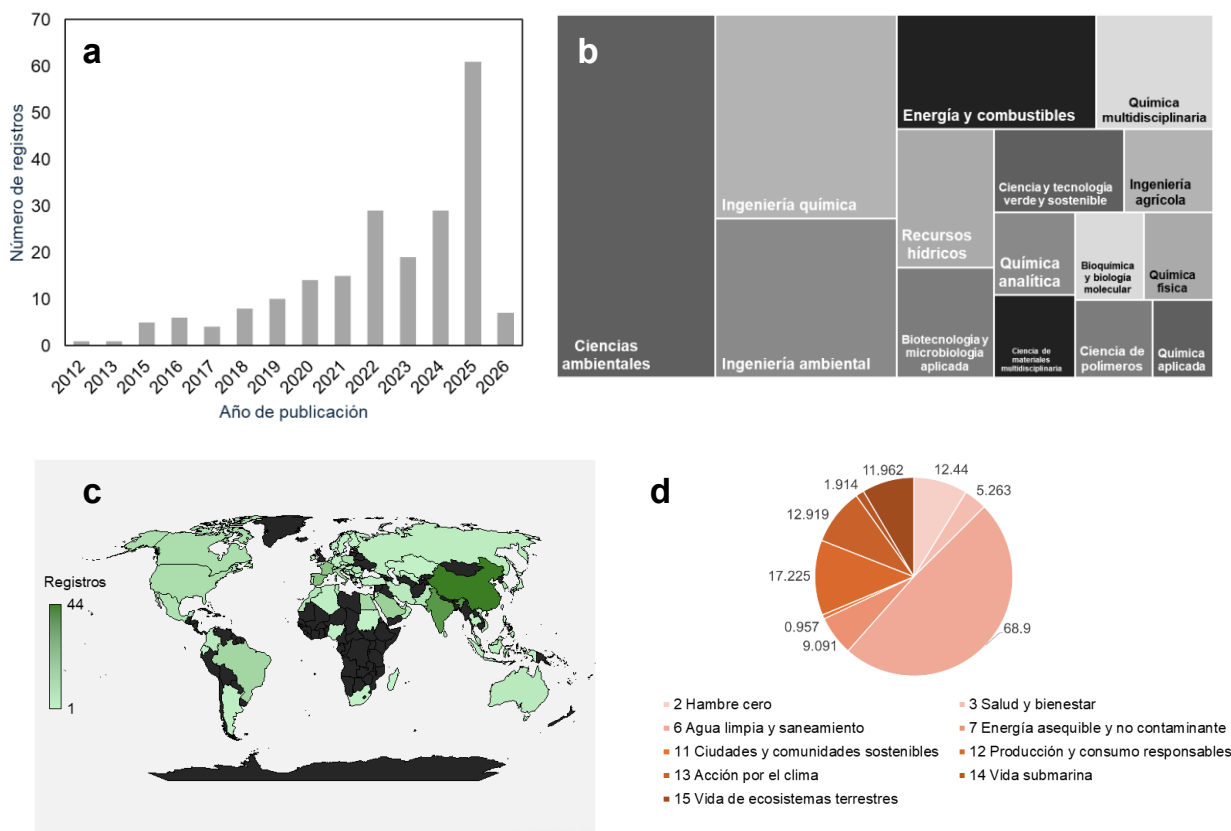


Fig. 1: Registros obtenidos mediante el análisis bibliométrico: a) Publicaciones por año, b) Categorías de WoS, c) Registros por país y d) Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La clasificación por categorías de WoS (Fig. 1b) muestra una tendencia hacia la interdisciplina en este campo de investigación. Las Ciencias ambientales lideran, seguidas por Ingeniería química e Ingeniería ambiental. Este comportamiento puede atribuirse al fortalecimiento de las investigaciones orientadas a la economía circular, al

aprovechamiento de biomásas y al desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de agua. La presencia de categorías como Energía y combustibles, Química multidisciplinaria, Recursos hídricos y Ciencia y tecnología verde y sostenible demuestra la relación entre el tratamiento de agua, el desarrollo de materiales adsorbentes y la sostenibilidad energética. Asimismo, la participación de áreas como Ciencia de materiales, Química analítica, Ciencia de polímeros y Biotecnología aplicada indica el interés por mejorar y optimizar las propiedades fisicoquímicas de los materiales adsorbentes elaborados a partir de biomásas.

La distribución de los registros por países (Fig. 1c) indica una amplia participación global. China encabeza la producción científica con el 21 % de los registros (44), seguida por India con 16.2 % (34), España con 9.5 % (20), Francia con 8.6 % (18) y Arabia Saudita con 6.2 % (13). En América Latina destacan Brasil, con 5.2 % (11), y México, con 3.35 % (7), lo que sitúa a este último por encima de varias naciones de la región y en un grupo comparable con países europeos como Grecia y Rumanía.

Finalmente, el análisis de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Fig. 1d) muestra que las publicaciones se han enfocado principalmente en atender prioridades globales de sostenibilidad. El ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) se encuentra en primer lugar con cerca del 70 % de las publicaciones, lo cual concuerda con el enfoque de las publicaciones sobre la remoción de metales pesados del agua mediante procesos de adsorción basados en biomasa. Asimismo, el ODS 12 (Producción y consumo responsables) refleja el interés en la valorización de biomásas, sus residuos y subproductos como materiales adsorbentes, reforzando los principios de la economía circular. La contribución al ODS 13 (Acción por el clima) y al ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) sugiere que estas investigaciones también exploran vínculos entre el desarrollo de materiales, la eficiencia energética y la reducción de impactos ambientales.

METODOLOGÍA

Síntesis y modificación de carbonizado de hueso

Los ejemplares de pez diablo utilizados en este estudio fueron capturados en el río Moctezuma, en el municipio de Tampamolón Corona, San Luis Potosí, México. La limpieza de los huesos inició con la evisceración y el retiro manual de los tejidos blandos, separando la estructura ósea. Posteriormente, con el objetivo de lograr la remoción completa de impurezas tales como grasa, proteínas y otros componentes no deseados, los huesos se sometieron a un tratamiento en una solución de agua desionizada y H_2O_2 (6:1) durante 1 h. A continuación, los huesos fueron lavados repetidamente con agua desionizada hasta eliminar completamente los residuos de peróxido y posteriormente se secaron en una estufa a 100 °C durante 12 h. Los huesos secos se trituraron en un molino (IKA A10 basic) con el fin de obtener un tamaño de partícula fino.

Los huesos pulverizados se calcinaron en un horno tubular horizontal (Thermoelectric Inc., modelo TH1200), a 800 °C durante 3 h, empleando una rampa de calentamiento de 10 °C min^{-1} . El carbonizado resultante se identificó como CPD. La modificación química del carbonizado se realizó mediante el método de impregnación húmeda, utilizando 6 g de CPD y 50 mL de una solución de NaNO_3 (Golden Bell, 98%) preparada al 50 % (p/v). La mezcla se sometió a un baño de ultrasonido durante 1.5 h y, posteriormente, se dejó decantar. El sólido obtenido se secó en estufa a 100 °C durante 12 h. Finalmente, el carbonizado impregnado y seco fue sometido a un segundo tratamiento térmico a 800 °C durante 3 h, con una rampa de calentamiento de 10 °C min^{-1} . El material obtenido se denominó CPDM.

Experimentos de remoción de Cd(II)

Los datos de equilibrio de adsorción de Cd(II) sobre el CPD y el CPDM se obtuvieron mediante experimentos en sistemas por lote. A partir de una solución patrón de Cd(II) con una concentración de 1000 mg L^{-1} , se prepararon soluciones con concentraciones en el intervalo de 100 a 500 mg L^{-1} . En tubos de centrifuga de 50 mL se adicionaron 40 mL de cada solución con 0.1 g de carbonizado. El pH de las soluciones se ajustó a valor de 7 con HNO_3 y NaOH 0.1 N (JT Baker). Los sistemas se mantuvieron a 25 °C durante un periodo de 5 días, realizando el ajuste de pH cada 24 h para asegurar su estabilidad. Al finalizar el tiempo de contacto, la concentración de Cd(II) se determinó mediante espectroscopía de absorción atómica, utilizando un equipo Varian, modelo SpectraAA-20. La capacidad de adsorción de Cd(II), q , se calculó a partir de un balance de masa, de acuerdo con la ecuación (1):

$$q = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (1)$$

donde, q es la masa adsorbida de Cd(II) en el equilibrio (mg g^{-1}), C_0 y C_e son la concentración inicial y final (mg L^{-1}), V es el volumen de la solución (L) y m es la masa de carbonizado (g).

Morfología y grupos funcionales superficiales

Los carbonizados CPD y CPDM se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) con el fin de analizar la morfología de su superficie, utilizando un equipo Thermo Fisher Scientific, modelo Quanta 250 FEG, acoplado a un detector de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS), lo que permitió realizar un análisis cualitativo de la composición elemental presente en la superficie de los carbonizados. La identificación de los grupos funcionales superficiales del hueso de pez diablo y de los carbonizados, antes y después del proceso de adsorción de Cd(II), se llevó a cabo mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), empleando un espectrofotómetro Thermo Scientific, modelo Nicolet iS10.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Microscopía electrónica de barrido

El análisis mediante MEB permitió evaluar la morfología y las características estructurales de las partículas de CPD, CPDM y CPD_Cd, así como determinar su composición química elemental mediante microanálisis por EDS. La micrografía de la superficie de CPD a 1000 $\times$ (Fig. 2a) muestra que la estructura de las partículas es irregular y presenta un tamaño heterogéneo, con una superficie ligeramente fracturada, porosa y rugosa. Esta porosidad puede atribuirse al tratamiento con la solución de H_2O_2 y agua desionizada (1:6); asimismo, las características observadas concuerdan con las reportadas para carbonizados óseos sintetizados a altas temperaturas (Hu *et al.*, 2024). Por otra parte, en la micrografía correspondiente a CPDM (Fig. 2b) se observa una dispersión homogénea del agente modificante (NaNO_3) sobre la superficie porosa del material carbonizado, lo que sugiere una impregnación efectiva del modificador en la matriz del adsorbente. Este fenómeno se corrobora en el espectro infrarrojo de CPDM (Fig. 2a), donde se aprecia la atenuación de las bandas características de CPD después de la modificación. En el caso de CPDM Cd (Fig. 2c), la superficie presenta una aparente obstrucción parcial de los poros y la presencia de agregados, así como zonas con mayor intensidad de brillo en los bordes y una textura distinta a la del material sin saturar (CPDM). La presencia de agregados sugiere la interacción y retención de Cd(II) en la superficie del adsorbente, lo que evidencia el proceso de adsorción.

En la Fig. 2d-f se presenta el microanálisis químico elemental de CPD, CPDM y CPDM_Cd, respectivamente. En la Fig. 2d se observa que los principales constituyentes del carbonizado corresponden a Ca (40.4%), P (14.4%) y O (39.8%). La presencia de Ca y P se atribuye a la composición de la hidroxiapatita (HAp) presente en los carbonizados de hueso y el contenido de C (4.5%) y Na (0.4%) corresponde a la fracción carbonosa que permanece en el material en forma de grafito (Nigri *et al.*, 2017), derivada del proceso de síntesis a altas temperaturas, como el empleado en la preparación de CPD (800 $^{\circ}\text{C}$). En la Fig. 2e, correspondiente a CPDM, existe una disminución en el contenido de Ca (28.6%), P (11.3%) y O (38.0%); sin embargo, se identifica la presencia de Na (4.5%), asociado al agente modificante (NaNO_3) impregnado en la superficie del material. Finalmente, en la Fig. 2f, correspondiente a CPDM_Cd, además de los elementos previamente mencionados, se detecta la presencia de Cd (9.1%), lo cual confirma la retención del metal sobre la superficie del carbonizado tras el proceso de adsorción. Este resultado concuerda con las observaciones morfológicas obtenidas por MEB y los espectros de infrarrojo (IR) de la Fig 3b.

Espectroscopía Infrarroja

Los espectros IR del hueso, CPD y CPDM (Fig. 3a), así como de CPD Cd y CPDM_Cd (Fig. 3b), permitieron identificar los grupos funcionales durante los cambios estructurales en la matriz mineral y orgánica del hueso derivados de los procesos de carbonización, modificación con NaNO_3 y de la adsorción de Cd(II) sobre los materiales carbonizados. En todos los espectros se observa una banda en la región de 3336-3600 cm^{-1} , atribuida al

estiramiento de grupos hidroxilo (-OH), asociados tanto a enlaces por puentes de hidrógeno como a -OH estructurales. La región entre 1562 y 1645 cm^{-1} se asocia a las bandas de Amida I y Amida II (Rashed *et al.*, 2024), relacionadas con proteínas, colágeno y remanentes de tejido orgánico, las cuales presentan mayor intensidad en el hueso y disminuyen progresivamente en CPD y CPDM, lo que se atribuye a la degradación y eliminación de la fracción orgánica durante la carbonización a 800 °C. El pico en 1411 cm^{-1} se asocia a vibraciones de grupos carbonato (CO_3^{2-}) y al estiramiento simétrico de grupos carboxilato ($-\text{COO}^-$), las bandas en 1086 y 962 cm^{-1} corresponden a vibraciones de los grupos fosfato (PO_4^{3-}) (Hu *et al.*, 2024); estos resultados confirman que el componente mineral predominante en los carbonizados es fosfato de calcio (asociado a la HAp).

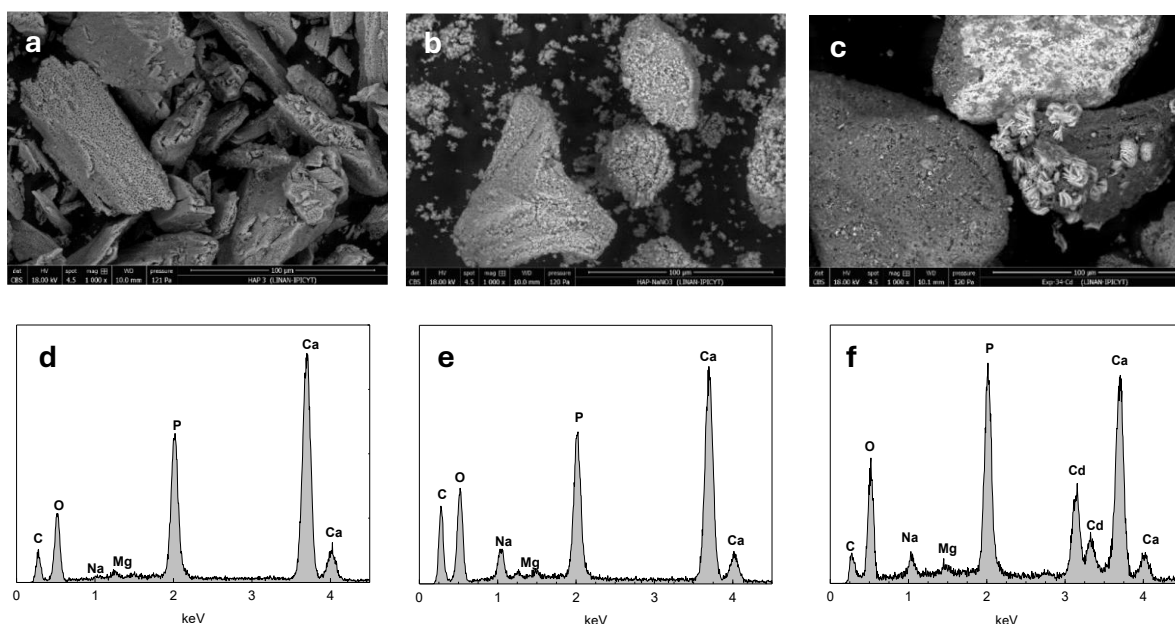


Fig. 2: Micrografías a 1000×: a) CPD, b) CPDM y c) CPDM_Cd. Espectros EDS: d) CPD, e) CPDM y f) CPDM_Cd.

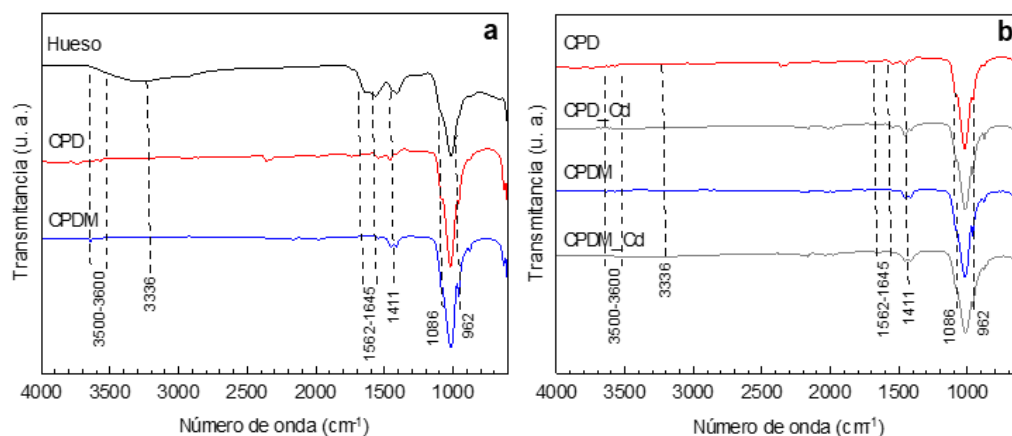


Fig. 3: a) Espectros IR de hueso de pez diablo, CPD y CPDM, b) Espectros IR de los carbonizados antes (CPD y CPDM) y después del proceso de absorción de Cd(II) (CPD_Cd y CPDM_Cd).

En el espectro IR del CPDM se observa que la modificación no alteró las vibraciones moleculares de la HAp formada tras el tratamiento térmico, ya que se conservaron sus bandas características (Essamlali *et al.*, 2017); sin embargo, se aprecia una intensificación de las señales asociadas a grupos oxigenados, lo que sugiere un

incremento en la disponibilidad de sitios activos y una superficie químicamente modificada (Abegunde *et al.*, 2020). Los espectros IR de CPD_Cd y CPDM_Cd muestran disminuciones de intensidad y ligeros desplazamientos en las bandas correspondientes a -OH, C=O y -COO⁻ (3336, 1562-1645 y 1411 cm⁻¹), lo que confirma la participación de estos grupos funcionales en la adsorción de Cd(II).

Evaluación de la capacidad de adsorción de Cd(II)

Los datos experimentales de equilibrio de adsorción de Cd(II) sobre CPD y CPDM se ajustaron mediante los modelos de isotermas de Langmuir y Freundlich (Ecs. 2 y 3). Los valores de los parámetros de ambos modelos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de los modelos de las isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich a pH 7 y 25 °C para la adsorción de Cd(II) sobre CPD y CPDM.

Modelos	Parámetros	CPD	CPDM
Langmuir $q = \frac{q_m KC}{1 + KC}$ (2)	q_m (mg g ⁻¹)	31.96	54.55
	K (L mg ⁻¹)	0.04	0.08
	R^2	0.92	0.96
Freundlich $q = kC^{1/n}$ (3)	k (mg g ⁻¹) (L mg ⁻¹) ^{1/n}	9.08	15.27
	N	7.78	4.69
	R^2	0.99	0.96

q = capacidad de adsorción (mg g⁻¹), C = concentración en el equilibrio (mg L⁻¹).
Parámetros de Langmuir: q_m = (mg g⁻¹) y K (mg L⁻¹). Parámetros de Freundlich:
 k (mg g⁻¹ (mg L⁻¹)^{1/n}), n es la intensidad de adsorción.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo de Freundlich fue el que mostró el mejor ajuste a los datos experimentales (Fig. 4a), lo cual indica que el proceso de adsorción se desarrolla sobre una superficie energéticamente heterogénea. Este comportamiento es característico de sistemas de adsorción no ideales y reversibles, en los que la interacción adsorbente-adsorbato puede darse mediante la formación de multicapas sobre una superficie con una distribución no homogénea de los sitios de adsorción (Nigri *et al.*, 2017). La capacidad de adsorción determinada para CPD fue de 27.9 mg g⁻¹ y para CPDM de 46.1 mg g⁻¹, respectivamente (Fig. 4b). Esto representa un incremento en la capacidad de adsorción del 65% cuando el carbonizado fue modificado con NaNO₃ y se puede atribuir a la oxidación superficial, aumento en la porosidad y la acidez del material, fenómenos que han sido reportados al emplear NaNO₃ a altas temperaturas en materiales adsorbentes (Abegunde *et al.*, 2020; Kim & Lee, 2019). La capacidad de adsorción se evaluó a pH de 7, este valor se consideró con base en la especiación química del Cd(II) en solución acuosa, donde predomina la forma catiónica (Cd²⁺) y se inicia la formación de especies hidroxiladas (Espinosa-Martínez *et al.*, 2024).

pH < 6= Cd²⁺

pH ≈ 6-8= Cd²⁺ + H₂O ↔ CdOH⁺ + H⁺, pKa≈7.8-8.2

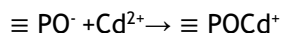
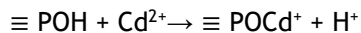
CdOH⁺ + H₂O ↔ Cd(OH)₂ (ac) + H⁺, pKa≈9.5-10

pH > 8-8= Cd²⁺ + 2OH⁻ → Cd(OH)₂ (s)

La adsorción de Cd(II) sobre los carbonizados se ve favorecida por el pH neutro de la solución, el cual promueve la desprotonación de los grupos -COOH y -OH, generando una superficie con carga negativa que atrae electrostáticamente al Cd²⁺, especie predominante bajo estas condiciones, y reduce la competencia con H⁺ (Rashed *et al.*, 2024). Por lo tanto, la adsorción puede atribuirse a la naturaleza mineral y funcional de los carbonizados, particularmente a la presencia de grupos PO₄³⁻ asociados a la HAp, los cuales favorecen la remoción de metales pesados mediante interacciones electrostáticas y complejación superficial (Cheung *et al.*, 2001). Así mismo, se propone un mecanismo de intercambio iónico entre el Cd²⁺ en solución y el Ca²⁺ presente en la HAp, lo cual se corrobora con las variaciones observadas en las bandas de los espectros IR (Fig. 3b) después del proceso de adsorción (Sangeetha *et al.*, 2018). Estos mecanismos describen la afinidad de los carbonizados con el Cd(II) y la eficiencia de

la capacidad de adsorción de Cd(II) observada (Biswas *et al.*, 2023), especialmente en el carbonizado modificado. Los mecanismos mencionados pueden expresarse mediante las siguientes reacciones:

Interacciones electrostáticas y complejación superficial:



Intercambio iónico:

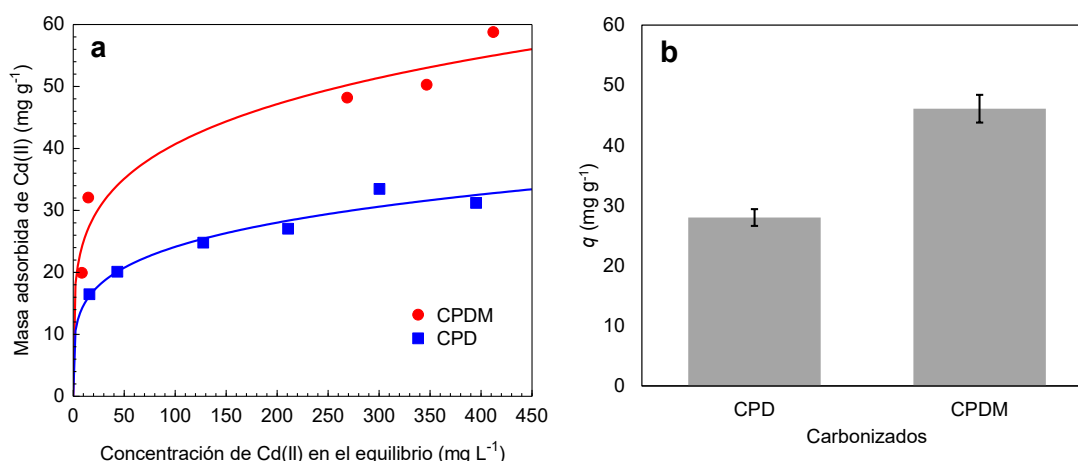
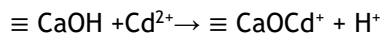


Fig. 4: a) Isothermas de adsorción de Cd(II), b) Capacidad de adsorción de Cd(II) sobre CPD y CPDM a pH 7 y 25 °C.

CONCLUSIONES

La estructura ósea del pez diablo presenta un alto potencial para ser utilizada como precursor en la obtención de carbonizados de hueso modificados, con aplicación como adsorbentes de Cd(II). La caracterización morfológica evidenció la presencia del agente modificante empleado, así como la incorporación del Cd(II) en la superficie de los carbonizados después del proceso de adsorción. El análisis mediante EDS corroboró la presencia elemental de los componentes característicos de la hidroxiapatita (Ca, P y O), principal constituyente mineral de los huesos. Por su parte, el análisis FTIR permitió identificar los principales grupos funcionales presentes en los carbonizados y evidenciar su interacción con el Cd(II) en solución. Los datos experimentales de adsorción se ajustaron al modelo de Freundlich, lo que sugiere un proceso de adsorción en superficies heterogéneas. La capacidad de adsorción determinada fue de 27.9 mg·g⁻¹ para CPD y de 46.1 mg·g⁻¹ para CPDM, lo que representa un incremento del 65 % en la capacidad de adsorción cuando el carbonizado fue modificado con NaNO₃. Los resultados evidenciaron que los carbonizados derivados de huesos de pez diablo, especialmente tras su modificación con NaNO₃, demostraron ser adsorbentes selectivos para Cd(II), ofreciendo una solución innovadora basada en la valorización de la biomasa de esta especie invasora para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados.

AGRADECIMIENTOS

A.I. Flores-Rojas, H.G. Cisneros-Ontiveros y A. Rojas-Frias agradecen a la SECIHTI. Agradecemos a la Dra. Gladis Judith Labrada Delgado del LINAN-IPICYT. Al Fideicomiso 23871, administrado por el Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología, en el marco de la Convocatoria 2023-01 (No. 2383).

REFERENCIAS

- Abegunde, S.M., Idowu, K.S., Adejuwon, O.M. & Adeyemi-Adejolu, T. (2020). A review on the influence of chemical modification on the performance of adsorbents. In *Resources, Environment and Sustainability* (Vol. 1). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2020.100001>
- Abiye, T.A. & Bhattacharya, P. (2019). Arsenic concentration in groundwater: Archetypal study from South Africa. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100246. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100246>
- Biswas, P.P., Rathod, J., Chiang, C.Y., Liang, B., Wang, C.C., Lee, Y.C., *et al.* (2023). First principal observation documenting the three-dimensional uptake of cadmium and spatial distribution of cadmium hydroxyapatite mineral in bone char. *Chemosphere*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139357>
- Bonilla-Petriciolet, A., Mendoza-Castillo, D. I. & Reynel-Ávila, H. E. (2017). Introduction. In *Adsorption Processes for Water Treatment and Purification* (pp. 1-18). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58136-1_1
- Boyd, C.E. (2020). *Water Quality*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8>
- Cheung, C.W., Porter, J.F. & McKay, G. (2001). Sorption kinetic analysis for the removal of cadmium ions from effluents using bone char. *Water Research*, 35 (3), 605-612. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00306-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00306-7)
- Cisneros-Ontiveros, H.G., Medellín-Castillo, N.A., Flores-Rojas, A.I. & Cruz-Briano, S.A. (2024). Removal of fluoride, cadmium and triclosan from water using bone chars from an invasive species: Optimization, equilibrium and adsorption mechanisms. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 8 (100182), 100182. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100182>
- Cruz-Briano, S.A., Medellín-Castillo, N.A., Delgado-Sanchez, P., Castro-Larragoitia, G.J., Leyva-Ramos, R., Cortina-Rangel, M.A., *et al.* (2023). Binary fluoride and As(V) adsorption in water using pleco fish bone chars. *Environmental Science and Pollution Research International*. 31 (28), 40156-40173. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29101-8>
- Espinosa-Martínez, I.A., Medellín-Castillo, N.A., Flores-Rojas, A.I., Cisneros-Ontiveros, H.G., Díaz-Flores, P.E., Chaparro-Garnica, C.Y., *et al.* (2024). Synthesis and application of chitosan and orange peel biocomposites for cadmium (II) removal from water. *MRS Advances*, 9, 1720-1727. <https://doi.org/10.1557/s43580-024-00987-x>
- Essamlali, Y., Amadine, O., Larzek, M., Len, C. & Zahouily, M. (2017). Sodium modified hydroxyapatite: Highly efficient and stable solid-base catalyst for biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 149, 355-367. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.028>
- Fernandez, E., Amutio, M., Artetxe, M., Lopez, G., Santamaria, L., Lopez, J.E., *et al.* (2024). Exploring the potential of fast pyrolysis of invasive biomass species for the production of chemicals. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 183, 106817. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106817>
- Hassan, W., Zafar, M., Hassan, H., Kamdem, J. P., Duarte, A.E. & da Rocha, J.B.T. (2020). Ten years of Arabian Journal of Chemistry: A bibliometric analysis. *Arabian Journal of Chemistry*, 13 (11), 7720-7743. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.09.007>
- Havel, J.E., Kovalenko, K.E., Thomaz, S.M., Amalfitano, S. & Kats, L.B. (2015). Aquatic invasive species: challenges for the future. In *Hydrobiologia* (Vol. 750, Number 1, pp. 147-170). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2166-0>
- Hu, L., Wan, J., Tang, K., Yu, H., Huang, T., Fan, D., *et al.* (2024). Effect of artificial aging on physicochemical properties of bone char and adsorption properties of Cd²⁺. In *Carbon Trends* (Vol. 17). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2024.100441>

- Jadaa, W. (2024). Wastewater Treatment Utilizing Industrial Waste Fly Ash as a Low-Cost Adsorbent for Heavy Metal Removal: Literature Review. *Clean Technologies*, 6 (1), 221-279. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6010013>
- Juela, D.M. (2022). Promising adsorptive materials derived from agricultural and industrial wastes for antibiotic removal: A comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, 284, 120286. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120286>
- Kanwal, A., Rehman, R., Imran, M., Samin, G., Jahangir, M.M. & Ali, S. (2023). Phytoremediative adsorption methodologies to decontaminate water from dyes and organic pollutants. In *RSC Advances* (Vol. 13, Number 38, pp. 26455-26474). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3ra02104a>
- Kim, S. & Lee, K.B. (2019). Impregnation of hydrotalcite with NaNO₃ for enhanced high-temperature CO₂ sorption uptake. *Chemical Engineering Journal*, 356, 964-972. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.207>
- Kumar, A.B., Schofield, P.J., Raj, S. & Satheesh, S. (2018). Salinity tolerance of non-native suckermouth armoured catfish (Loricariidae: Pterygoplichthys sp.) from Kerala, India. *Management of Biological Invasions*, 9 (1), 49-57. <https://doi.org/10.3391/mbi.2018.9.1.05>
- Mansour, F., Al-Hindi, M., Yahfoufi, R., Ayoub, G.M. & Ahmad, M.N. (2018). The use of activated carbon for the removal of pharmaceuticals from aqueous solutions: a review. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 17, Number 1, pp. 109-145). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9456-8>
- Mubarak, M.F., Yousef, T.A., Salim, S.A., Abou-Krishna, M.M., Kamoun, E.A. & Mahmoud, T. (2026). Design and functionalization of a hierarchical Cu-BTC/Zeolite A4 composite with tannic acid for high-performance heavy metal removal: Synergistic adsorption mechanisms, kinetic insights, and reusability evaluation. *Applied Materials Today*, 49, 103123. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2026.103123>
- Nigri, E.M., Cechinel, M.A.P., Mayer, D.A., Mazur, L.P., Loureiro, J.M., Rocha, S.D.F., et al. (2017). Cow bones char as a green sorbent for fluorides removal from aqueous solutions: batch and fixed-bed studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (3), 2364-2380. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7816-5>
- Pei, N., Luo, W., Huang, Q. & Sun, Y. (2024). Adsorption Properties of Fishbone and Fishbone-Derived Biochar for Cadmium in Aqueous Solution. *Agronomy*, 14 (11), 2717. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112717>
- Rahimzadeh, M.R., Rahimzadeh, M.R., Kazemi, S. & Moghadamnia, A.A. (2017). Cadmium toxicity and treatment: An update. In *Caspian Journal of Internal Medicine* (Vol. 8, Number 3, pp. 135-145). Babol University of Medical Sciences. <https://doi.org/10.22088/cjim.8.3.135>
- Rashed, M.N., Gad, A.A.E.M. & Fathy, N.M. (2024). Efficiency of chemically activated raw and calcined waste fish bone for adsorption of Cd (II) and Pb (II) from polluted water. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14 (24), 31703-31720. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04885-4>
- Sangeetha, K., Vidhya, G., Vasugi, G. & Girija, E. K. (2018). Lead and cadmium removal from single and binary metal ion solution by novel hydroxyapatite/alginate/gelatin nanocomposites. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6 (1), 1118-1126. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.018>
- Schweitzer, L. & Noblet, J. (2018). Water Contamination and Pollution. In *Green Chemistry: An Inclusive Approach* (pp. 261-290). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00011-X>
- Şimşek, Y.E. (2025). Preparation of a mesoporous adsorbent from abattoir wastes via microwave-assisted chemical activation for efficient Pb (II) removal: Optimization, modeling, and prediction performance using RSM and ANN approaches. *Journal of Water Process Engineering*, 75, 108028. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108028>

- WHO (2022). *Fourth edition incorporating the first and second addenda Guidelines for drinking-water quality*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- Yuan, Z., Luo, T., Liu, X., Hua, H., Zhuang, Y., Zhang, X., et al. (2019). Tracing anthropogenic cadmium emissions: From sources to pollution. *Science of The Total Environment*, 676, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.250>

