



SEMINÁRIO INTERNACIONAL BRASIL - COLÔMBIA SOBRE PROCESSOS INDUSTRIAIS SUSTENTÁVEIS



Síntesis y caracterización de materiales adsorbente a base de hidroxiapatita y carbón activado para remoción de contaminantes de agua potable

Andrés Cañón Ibarra ^{1*}; Henry Reyes Pineda ¹

*afcanon1@uniquindio.edu.co

¹Universidad del Quindío, Doctorado en ciencias, Grupo de investigación en ciencias ambientales (INCIAM).

INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable, pese a ser un derecho humano fundamental, continúa siendo un desafío global prioritario, tal como lo reconoce el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6), orientado a garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua. A pesar de la aparente abundancia de este recurso, menos del 1 % del agua del planeta es dulce y apta para el consumo humano. Esta situación se agrava por la creciente contaminación derivada del uso indiscriminado de compuestos farmacéuticos, agroquímicos, metales pesados y colorantes, considerados contaminantes emergentes. Estas sustancias, incluso en bajas concentraciones, representan un riesgo para la salud pública, y su control es limitado, especialmente en países en desarrollo, donde los sistemas de tratamiento son deficientes. (ISRAEL DIKOBÉ et al., 2024; JURCZYNSKI et al., 2024)

Ante esta problemática, se propone el desarrollo de un prototipo de potabilización de agua mediante tecnologías de adsorción, utilizando un material bioadsorbente híbrido compuesto por hidroxiapatita y carbón activado. Ambos materiales, obtenidos de residuos naturales, presentan propiedades favorables para la remoción de contaminantes. El carbón activado destaca por su alta porosidad y funcionalización superficial, mientras que la hidroxiapatita ofrece capacidad de intercambio iónico y adsorción, potenciada al ser modificada superficialmente. La sinergia entre estos materiales mejora la eficiencia de remoción de compuestos tóxicos. (YIN et al., 2024)

El prototipo será diseñado considerando las propiedades fisicoquímicas y cinéticas del material, las características del recurso hídrico en zonas rurales del departamento del Quindío y los lineamientos del Decreto 1575 de 2007 sobre calidad del agua potable en Colombia. Esta propuesta busca ofrecer una alternativa sostenible, eficiente y de bajo costo para mejorar el acceso a agua segura en comunidades vulnerables. (BOUAZZI et al., 2023)

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente proyecto propone el diseño de un proceso de potabilización de agua basado en procesos de adsorción, empleando un material bioadsorbente híbrido compuesto por hidroxiapatita (HAp) y carbón activado (CA). Esta combinación busca aprovechar la sinergia entre las propiedades fisicoquímicas de ambos materiales para mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes emergentes en agua potable.

Obtención y preparación de los materiales:

Seminário Internacional Brasil - Colômbia Sobre Processos Industriais Sustentáveis

<https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/semibrasilcol/index>

Santa Cruz do Sul, 2025

El carbón activado es obtenido a partir de residuos agroindustriales mediante procesos de carbonización y activación térmica, optimizados para generar una alta área superficial, elevada porosidad y presencia de grupos funcionales como carboxilos e hidroxilos. La hidroxiapatita se obtendrá de residuos óseos de origen bovino y escamas de peces, fuentes ricas en calcio y fósforo, mediante tratamientos térmicos y químicos que garanticen la pureza y funcionalidad del material.

Síntesis del material híbrido HAp/CA:

El material bioadsorbente híbrido fue sintetizado mediante técnicas de impregnación y agitación mecánica, ajustando la proporción HAp/CA en función de su rendimiento adsorbente frente a diferentes contaminantes. Posteriormente, se aplicarán modificaciones superficiales a la hidroxiapatita para mejorar su estabilidad térmica, mecánica e hidrofobicidad, características que potencian su capacidad de adsorción y favorecen la interacción con compuestos químicos presentes en el agua.

Caracterización del material híbrido:

Se realizaron análisis estructurales y morfológicos utilizando técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (XRD) y análisis BET para determinar la estructura porosa, área superficial y grupos funcionales. Además, se evaluará la capacidad de intercambio iónico y la estabilidad del material frente a diferentes condiciones de pH y temperatura.

Estudios de adsorción:

Se llevó a cabo ensayos en laboratorio para evaluar la eficiencia del material en la remoción de contaminantes emergentes seleccionados, como metales pesados (Pb^{2+} , Cd^{2+}), fármacos (ibuprofeno, amoxicilina), agroquímicos (glifosato) y colorantes sintéticos. Se estudiarán variables como el tiempo de contacto, la concentración inicial del contaminante, el pH de la solución, la dosis del adsorbente y la temperatura del sistema. Se aplicarán modelos cinéticos (pseudo primer y segundo orden) e isothermas de adsorción (Langmuir y Freundlich) para determinar la capacidad y naturaleza del proceso de adsorción.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El proyecto contempla varios objetivos específicos con resultados esperados claros, orientados a ofrecer una solución viable, sostenible y replicable para la potabilización de agua en contextos rurales vulnerables:

Obtención y caracterización del material híbrido HAp/CA

El desarrollo del material bioadsorbente híbrido hidroxiapatita/carbón activado (HAp/CA) se orientó hacia la integración de las propiedades más relevantes de ambos componentes: la elevada área superficial y capacidad de adsorción del carbón activado, junto con la funcionalidad iónica y estabilidad estructural de la hidroxiapatita. La obtención del carbón activado se realizó mediante carbonización controlada de residuos agroindustriales, seguida de una activación química con ácido fosfórico, obteniendo una estructura con microporos predominantes y una superficie funcionalizada rica en grupos oxigenados.

Por su parte, la hidroxiapatita fue sintetizada a partir de huesos bovinos, a través de un tratamiento térmico a 800 °C, lo cual permitió la eliminación de materia orgánica y la obtención de un polvo cristalino

rico en calcio y fósforo. La proporción óptima entre HAp y CA se estableció en una relación de 60:40, determinada tras pruebas preliminares de capacidad adsorbente y estabilidad estructural.

La caracterización del material híbrido mostró resultados favorables:

Análisis BET: Se observó un aumento significativo en el área superficial con valores superiores a 500 m²/g, atribuido a la presencia de carbón activado, lo que favorece una mayor interacción entre contaminantes y el material.

Microscopía electrónica de barrido (SEM): Reveló una estructura porosa heterogénea con canales y cavidades interconectadas, útiles para la adsorción multicomponente.

Difracción de rayos X (XRD): Confirmó la preservación de la fase cristalina de la hidroxiapatita y la distribución homogénea del carbón activado sin formación de fases secundarias, lo cual evidencia una integración física estable del compuesto híbrido.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR): Identificó grupos funcionales clave como –OH, –PO₄³⁻, –COOH y –C=O, capaces de formar enlaces con especies metálicas y orgánicas en soluciones acuosas, lo que aporta funcionalidad química al sistema.

Además, se verificó que la modificación superficial de la hidroxiapatita, mediante tratamientos en medio alcalino, incrementó la densidad de grupos reactivos disponibles, mejorando su interacción con contaminantes polares y aumentando su estabilidad hidrotérmica. Estos resultados validan que el material híbrido presenta una estructura optimizada para procesos de adsorción en medios acuosos.

Evaluación de la eficiencia frente a contaminantes emergentes

El material híbrido HAp/CA fue evaluado en sistemas de adsorción en lote, utilizando soluciones contaminadas con diferentes compuestos representativos de los denominados contaminantes emergentes: metales pesados (Pb²⁺ y Cd²⁺), compuestos orgánicos y colorantes sintéticos (azul de metileno). Las condiciones experimentales incluyeron variaciones de pH, dosis del adsorbente, tiempo de contacto, temperatura y concentración inicial del contaminante.

Los resultados mostraron alta eficiencia del material para la mayoría de los compuestos analizados:

Metales pesados: Se alcanzaron remociones mayores al 95% para Pb²⁺ y del 85% para Cd²⁺, especialmente en pH cercano a 6. La adsorción de iones metálicos se favoreció por la interacción con grupos fosfato y carboxilo, así como por los mecanismos de intercambio iónico propios de la hidroxiapatita.

Compuestos orgánicos: Para ibuprofeno y amoxicilina, se registraron eficiencias de remoción entre 70% y 85%, dependiendo del pH y la polaridad del compuesto. El mecanismo dominante se relacionó con la formación de puentes de hidrógeno y la interacción π - π con la superficie carbonosa.

Colorantes: Aunque la remoción fue más variable, se observó una eficiencia del 90% para el azul de metileno, especialmente en condiciones neutras a ligeramente básicas.

Desde el punto de vista cinético, los datos se ajustaron mejor al modelo de pseudo segundo orden, lo que indica que el proceso está controlado principalmente por quimiosorción, es decir, interacciones químicas entre el adsorbente y el contaminante, y no solo por difusión superficial. Las isothermas de Langmuir mostraron el mejor ajuste para la mayoría de los casos, lo que sugiere una adsorción monomolecular sobre una superficie homogénea con sitios activos equivalentes.

Cabe destacar que el material híbrido mantuvo un rendimiento estable en condiciones variables de temperatura (20–35 °C) y pH (4–8), lo que refuerza su aplicabilidad en entornos reales, como fuentes de

agua superficiales y pozos en áreas rurales. Asimismo, las pruebas de regeneración indicaron que tras cinco ciclos de adsorción/desorción con soluciones ácidas diluidas, el material retuvo más del 80% de su capacidad inicial, lo que reduce la necesidad de reposición constante y favorece su uso sostenible.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió el desarrollo de un material bioadsorbente híbrido, compuesto por hidroxiapatita y carbón activado, con características fisicoquímicas optimizadas para la remoción de contaminantes emergentes en agua potable. Los resultados experimentales demostraron una alta eficiencia de adsorción, especialmente frente a metales pesados, compuestos orgánicos y colorantes sintéticos, lo cual valida el potencial de esta tecnología en contextos rurales vulnerables del departamento del Quindío.

La sinergia entre los componentes del material promovió una mejora significativa en el área superficial, estabilidad térmica y capacidad de interacción con diversos tipos de contaminantes. Además, el material mostró resistencia estructural frente a variaciones de pH y temperatura, así como capacidad de regeneración tras múltiples ciclos de uso, lo que refuerza su viabilidad técnica y económica.

A partir de estos hallazgos, se concluye que el prototipo propuesto constituye una alternativa sostenible, de bajo costo y de fácil implementación para mejorar el acceso a agua segura en comunidades vulnerables. Futuros estudios deberán centrarse en la validación del sistema a escala piloto y en condiciones reales de operación, así como en la evaluación del impacto social y ambiental de su aplicación.

PALABRAS CLAVES

Carbón activado, Hidroxiapatita, adsorción, agua potable.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Universidad del Quindío por la financiación del proyecto de investigación y al director Henry Reyes Pineda por su apoyo y acompañamiento.

REFERENCIAS

BOUAZZI, D. et al. Beneficial effect of in-situ citrate-grafting of hydroxyapatite surface for water treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 666, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131366>. Acesso em: 4 jul. 2025.

DIKOBÉ, P. I. et al. Occurrence, persistence, and removal of contaminants of emerging concern through drinking water treatment processes – A case study in South Africa. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, v. 22, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100997>. Acesso em: 4 jul. 2025.

JURCZYNSKI, Y.; PASSOS, R.; CAMPOS, L. C. A review of the most concerning chemical contaminants in drinking water for human health. *Sustainability (Switzerland)*, v. 16, n. 16, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16167107>. Acesso em: 4 jul. 2025.

YIN, C. et al. Competitive adsorption behavior and adsorption mechanism of limestone and activated carbon in polymetallic acid mine water treatment. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 23561, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74240-8>. Acesso em: 4 jul. 2025.

Seminário Internacional Brasil - Colômbia Sobre Processos Industriais Sustentáveis

<https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/semibrasilcol/index>
Santa Cruz do Sul, 2025

Seminário Internacional Brasil - Colômbia Sobre Processos Industriais Sustentáveis

<https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/semibrasilcol/index>

Santa Cruz do Sul, 2025