

Aplicaciones de los compuestos de carbón activado e hidroxiapatita en la remoción de iones metálicos en aguas contaminadas: Una revisión bibliográfica.

Applications of activated carbon and hydroxyapatite compounds in the removal of metallic ions from contaminated water: A literature review.

M. V. Soto Gonzalez  ; N. Suarez León  ; N Alzate Acevedo  ; Naranjo Castaño  ; E. Restrepo Parra .

Abstract— Water contamination by heavy metal ions and other metallic species is a global environmental problem that requires efficacious solutions. This literature review article examines the use of activated carbon compounds and hydroxyapatite for the removal of metal ions in polluted waters. Key aspects such as the synthesis methods of these compounds, their adsorption capacity, and the mechanisms of metal ion removal are thoroughly analyzed. Additionally, the advantages and limitations of these compounds are discussed, along with their potential for large-scale application in water purification. It is concluded that activated carbon compounds and hydroxyapatite show promise for the elimination of metal ions, and future research areas are suggested to optimize their efficiency and applicability. This article provides an updated overview of the topic and is relevant for researchers and professionals involved in water management and environmental protection.

Index Terms— Activated carbon, Hydroxyapatite, Removal of metal ions, contaminated water, literature review.

Resumen—La contaminación del agua por metales pesados y otros iones metálicos es un problema ambiental global que requiere soluciones efectivas. En este artículo de revisión bibliográfica se analiza el uso de compuestos de carbón activado e hidroxiapatita para la remoción de iones metálicos en aguas contaminadas. Se examinan aspectos clave como los métodos de síntesis de estos compuestos, su capacidad de adsorción y los mecanismos de remoción de iones metálicos. Además, se discuten las ventajas y limitaciones de estos compuestos, así como su potencial para su aplicación a gran escala en la purificación del agua. Se concluye que los compuestos de carbón activado e hidroxiapatita son prometedores para la eliminación de iones metálicos y se sugieren áreas de investigación futura para optimizar su eficiencia y aplicabilidad. Este artículo proporciona una visión general actualizada del tema y es relevante tanto para investigadores como para profesionales involucrados en la gestión del agua y la protección del medio ambiente.

Palabras claves—Carbón activado, Hidroxiapatita, Remoción de iones metálicos, Aguas contaminadas, Revisión bibliográfica.

I. INTRODUCTION

Uno de los principales problemas a nivel mundial es la contaminación que presentan las fuentes hídricas del planeta, debido en mayor medida a los desechos que generan las industrias de la minería, el petróleo, gas, farmacéutica, de fusión del plomo, agrícolas, automotriz, entre muchas otras. Este tipo de industrias enriquecen el agua con metales como Pb, Cr, Cd, Cu, Zi y Ni excediendo los límites permitidos para el consumo, ya que la mayoría de estos iones son tóxicos, no biodegradables y se bioacumulan en los sistemas vivos, lo que puede causar enfermedades peligrosas para plantas, animales y humanos [1]–[6]. Es debido a esto que, la contaminación del agua por metales pesados y otros iones metálicos representa un desafío ambiental significativo en todo el mundo. La presencia de estos contaminantes puede tener efectos adversos en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos. En los últimos años, ha habido un creciente interés en desarrollar tecnologías eficientes para la remoción de iones metálicos en aguas contaminadas [7]–[9].

Es por esto por lo que, se le ha atribuido mucha importancia a la eliminación de estos iones metálicos presentes en las fuentes hídricas, a través, de diferentes métodos; entre los que se encuentran precipitación química, intercambio iónico, electrocoagulación, membranas de ósmosis inversa, fotocatalisis, floculación, técnicas electroquímicas [1]–[3]. Si bien estas técnicas han demostrado cierto grado de eficacia, presentan limitaciones en términos de costos, tiempo de operación, capacidad de adsorción y selectividad. La adsorción



Fig. 1. Resultados arrojados por el buscador Tree of Science.

por otro lado es uno de los métodos más usados debido a su aplicación sencilla y los bajos costos que presenta, por lo que se han desarrollado varios tipos para remoción y eliminación de metales pesados como nanopartículas magnéticas, biomasa de algas, carbón activado, hongos, hidrogeles magnéticos, cascara de arroz y en reportes que se han dado en la última década, se ha estudiado la aplicación de hidroxiapatita como bioadsorbente [4], [10]–[15]. De igual forma, el carbón activado se presenta como un material absorbente y catalítico debido a su gran porosidad y área superficial lo que le permite principalmente eliminar olores y color en aguas contaminadas, además es aplicado en los procesos de remoción de diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos que están disueltos en medios acuosos o gaseosos, lo que lo hace un compuesto ideal para el tratamiento de aguas residuales [16]–[19].

Además, la hidroxiapatita se presenta como un material eficaz para la adsorción de iones metálicos, debido a que tiene una buena característica amortiguadora, baja solubilidad en agua y tiene una alta estabilidad durante los procesos de oxidación, lo que lo hace un material propicio para la recuperación de iones metálicos de las aguas contaminadas [4], [11]–[14]. Estas características combinadas con el carbón activado permiten principalmente la atracción de los contaminantes metálicos hacia su superficie, donde ocurren fenómenos de adsorción física y química, lo que puede suponer una mejora por la sinergia de las propiedades de los dos compuestos y, aumenta así el rango y la adsorción de iones metálicos que pueden contaminar las fuentes hídricas [18], [20]–[22].

Dado lo anterior, el objetivo de este artículo de revisión bibliográfica es recopilar, analizar y sintetizar la literatura científica existente sobre las aplicaciones de carbón activado e hidroxiapatita al eliminar iones metálicos del agua contaminada. Se explorarán aspectos clave como los métodos de síntesis de estos compuestos, su capacidad de adsorción, los mecanismos de remoción de iones metálicos y los factores que influyen en su eficiencia. Además, se analizarán las ventajas y

limitaciones de los compuestos de carbón activado e hidroxiapatita como materiales adsorbentes. Se discutirán aspectos como su capacidad de regeneración, selectividad hacia diferentes metales y su aplicabilidad en condiciones reales.

Asimismo, se explorarán las perspectivas futuras para la aplicación a gran escala de estos compuestos en la purificación del agua. Se identificarán las áreas de investigación que requieren mayor atención, como la optimización de la composición del compuesto, el desarrollo de técnicas de regeneración más eficientes y la evaluación de su desempeño en sistemas de tratamiento de agua a nivel industrial, lo que proporcionará una visión general actualizada de las aplicaciones de los compuestos de carbón activado e hidroxiapatita en la eliminación de iones metálicos del agua contaminada.

II. METODOLOGÍA

Los criterios de búsqueda y selección de artículos para la elaboración de artículo de revisión bibliográfica sobre compuestos de carbón activado e hidroxiapatita para la eliminación de iones metálicos del agua contaminada incluyeron consideraciones importantes para asegurar la relevancia, calidad y actualidad de la información recopilada. Se utilizaron criterios como la relevancia temática, priorizando artículos que abordan directamente el tema de interés. Además, se consideró la actualidad de los estudios, priorizando investigaciones recientes para contar con la información más actualizada disponible. Se evaluó la calidad y credibilidad de los artículos, verificando la reputación de las revistas y los antecedentes de los autores.

Una vez fueron seleccionados los artículos pertinentes, se utilizaron métodos para analizar y sintetizar los datos recopilados, de esta forma se realizó un análisis temático para identificar los temas y subtemas principales abordados en los estudios seleccionados utilizando Tree of Science como herramienta web que usa la estructura de la red de citas para identificar la literatura relevante. La búsqueda de los artículos y publicaciones científicas se realizó utilizando las siguientes palabras claves: “hidroxiapatite”, “activated carbon”, “water” y “heavy metals”, a partir de lo cual se tuvo un discriminado de los artículos que se consideran las raíces, tronco y hojas de la investigación como se observa en la Fig. 1.

Posteriormente, se realizó un resumen y extracción de datos, destacando los hallazgos clave de cada estudio, incluyendo objetivos, metodología, resultados y conclusiones relevantes. Por último, se llevó a cabo un análisis comparativo para identificar similitudes, diferencias y tendencias en los resultados de los estudios seleccionados. Esto permitió resaltar los puntos de convergencia y divergencia entre los diferentes estudios. Finalmente, se realizó una síntesis y redacción de

TABLA I
MÉTODOS DE SÍNTESIS DEL CARBÓN ACTIVADO

Método de síntesis	Descripción	Parámetros de activación
Activación física	Carbonización y activación del carbonizado mediante la acción de gases oxidantes como vapor de agua, dióxido de carbono, aire, o mezclas de estos, siendo el oxígeno activo del agente activante [8]-[11].	Temperaturas entre un rango de 500 a 1200°C
Activación química	La carbonización y la activación tienen lugar en una sola etapa, llevada a cabo por la descomposición térmica de la materia prima impregnada con agentes químicos, tales como ácido fosfórico, cloruro de zinc, hidróxido de potasio o tiocianato potásico [8]-[11].	Temperaturas entre un rango de 450 a 800°C
Activación fisicoquímica	Combinación entre los procesos de activación física y activación química [8]-[11].	Temperaturas entre un rango de 500 a 1200°C

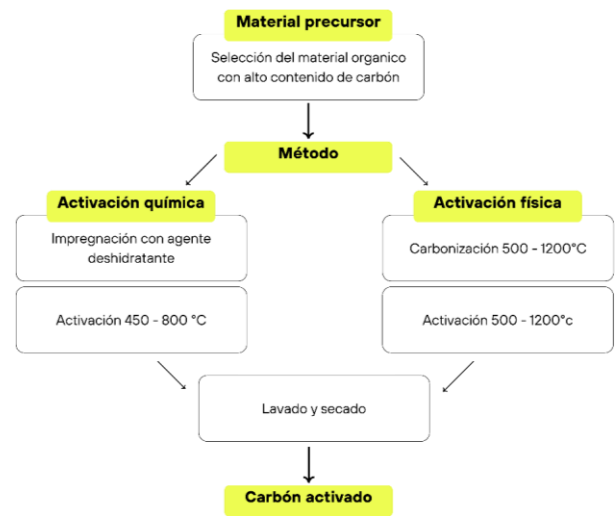


Fig. 2. Esquema general de comparación

lainformación recopilada, organizando los hallazgos de manera clara y concisa, y resaltando las conclusiones más relevantes y significativas.

III. RESULTADOS

A. Síntesis del compuesto de carbón activado e hidroxiapatita

1) Síntesis del carbón activado

El carbón activado (AC) es un material de naturaleza carbonosa que se distingue por su área de superficie interna ampliamente desarrollada, su alta porosidad y su estabilidad química, contiene diversos grupos funcionales que contienen oxígeno en su estructura, y ha sido extensivamente empleado como un adsorbente en catálisis y como soporte para catalizadores, así como en procesos de purificación y separación [16], [23]. La naturaleza del material precursor de carbono, así como los métodos de síntesis y condiciones de operación del proceso para la activación son factores primordiales para las características químicas y estructura interna de los poros, por tanto, para su elaboración se requiere el uso de una materia prima que cumpla con ciertas características específicas [18], [19], [21], [22].

Esas características incluyen la disponibilidad en abundancia, una estructura porosa inherente, alta dureza, un contenido de carbono elevado, un bajo contenido de cenizas y un alto rendimiento de masa durante el proceso de carbonización, materias primas como la madera, el carbón, lignito, endocarpios y huesos de algunas frutas como el coco y las olivas, cumplen con las características mencionadas [23], [24]. La obtención del carbón activado (AC) se da por medio de la carbonización y activación del material, mediante la carbonización se reduce el contenido volátil del material a través de la pirolisis de los precursores de carbono [22], [25]–[27]. Las principales técnicas de activación que se reportan en la literatura son: activación física, activación química y activación fisicoquímica, la activación física.

Como se mencionó anteriormente la activación química se

por medio de una reacción química con un reactivo que puede ser cloruro de zinc (ZnCl₂), hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH), ácido fosfórico (H₃PO₄), o carbonato de sodio (Na₂CO₃), siendo el ácido fosfórico uno de los más utilizados, puesto que se caracteriza por dos funciones muy importantes: la primera apoyar y promover la transformación pirolítica del material de partida y la segunda participar en la organización de la estructura reticulada de carbonoso material [28]. La Fig. 2. muestra un esquema general de comparación entre las variables de activación del material precursor.

2) Síntesis de la hidroxiapatita

La hidroxiapatita (HAp) es un compuesto mineral de fosfato de calcio con una estructura similar a la encontrada en la matriz inorgánica de los huesos y los dientes de humanos y vertebrados. Debido a sus propiedades bioactivas y su capacidad de sustitución e intercambio iónico, la HAp ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones biomédicas y ambientales[11], [29]–[31]. Para obtener este compuesto existen diversas formas de síntesis que se clasifican en dos categorías principales: métodos biológicos y métodos químicos. Los métodos biológicos para la síntesis de HA aprovechan la capacidad de ciertos organismos vivos para producir y acumular este compuesto mineral. Por otro lado, los métodos químicos se basan en reacciones químicas controladas que permiten la formación de HA a partir de precursores químicos. Algunos de los métodos químicos más utilizados son la precipitación química, la hidrotermal y la sol-gel [32]–[37]. La precipitación química es uno de los métodos más simples y ampliamente utilizados para sintetizar HA. Consiste en mezclar soluciones acuosas de fosfato y calcio en condiciones específicas de pH y temperatura, lo que provoca la precipitación de HA. La relación entre los precursores y las condiciones de reacción puede influir en las propiedades de la HA resultante, como su tamaño de partícula, estequiometría y cristalinidad[30], [32], [35], [37]–[39].

El método hidrotermal implica la reacción de precursores en un reactor a altas temperaturas y presiones, generalmente por encima de los 100 °C. Estas condiciones extremas favorecen la formación y el crecimiento de cristales de HA de mayor tamaño

TABLA II
MÉTODOS DE SÍNTESIS DE LA HIDROXIAPATITA

Método de síntesis	Descripción	Posibles fuentes de obtención	Temperatura
Hidrotermal	Reacción de precursores en un reactor a altas temperaturas y presiones, favoreciendo la formación y crecimiento de cristales de HA.	Precursores inorgánicos sintéticos (fosfatos y carbonatos de calcio)	50°C – 200°C
Sol-gel	Formación de un gel a partir de precursores químicos mediante reacciones de hidrólisis y condensación, seguido de tratamientos térmicos.	Precursores inorgánicos sintéticos (fosfatos y compuestos de calcio)	Desde temperatura ambiente Hasta 75°C
Precipitación húmeda	Mezcla de soluciones acuosas de fosfato y calcio junto con otros aditivos para controlar las propiedades de la HA formada.	Precursores inorgánicos sintéticos (fosfatos y carbonatos de calcio)	Entre 75°C – 95°C
Métodos térmicos o reacción de estado sólido.	Calcinación o tratamiento térmico de precursores orgánicos o inorgánicos que contienen fosfato y calcio, lo que promueve la formación de HA.	Precursores inorgánicos sintéticos (fosfatos y carbonatos de calcio) Huesos de animales, residuos de procesamiento de alimentos, precursores inorgánicos sintéticos	400°C – 1200°C
Método hidrotérmico asistido por microondas	Utilización de microondas para acelerar el proceso de hidrotermal, reduciendo el tiempo de síntesis de HA.	Precursores inorgánicos sintéticos (fosfatos y carbonatos de calcio)	—

y mayor estabilidad térmica. Por último, el método sol-gel se basa en la formación de un gel a partir de precursores químicos que luego se somete a tratamientos térmicos para obtener HAp. El gel se forma a través de reacciones de hidrólisis y condensación de los precursores en solución. Este método permite un mayor control sobre las propiedades de la HA, como su porosidad y morfología[40]–[42]. En cuanto a las fuentes de obtención de los precursores necesarios para la síntesis de la HA, estas pueden ser de origen sintético o natural. Los precursores sintéticos, como fosfatos y carbonatos de calcio, se obtienen mediante procesos químicos a partir de materiales inorgánicos. Por otro lado, los precursores naturales se derivan de fuentes biológicas, como huesos de animales o residuos de procesamiento de alimentos, que contienen compuestos de calcio y fósforo que pueden ser transformados en hidroxiapatita a partir de tratamientos térmicos o lo que se conoce como reacción de estado sólido donde, lo que se consigue es la sinterización de polvo de hueso principalmente, debido a cambios de fase y modificaciones estructurales que suceden debido a la incidencia de la temperatura en el material[40]–[43].

3) *Síntesis del compuesto de carbón activado e hidroxiapatita*

La síntesis de un compuesto de hidroxiapatita y carbón activado representa un área de investigación en constante desarrollo debido a las propiedades únicas y complementarias de estos materiales. La hidroxiapatita, conocida por su similitud estructural con el componente mineral del hueso, exhibe propiedades bioactivas y biocompatibles que la hacen atractiva para una amplia gama de aplicaciones en medicina regenerativa y odontología. Por otro lado, el carbón activado se destaca por su alta área superficial, porosidad y capacidad de adsorción, lo que lo convierte en un material ideal para aplicaciones de purificación de agua, filtración y adsorción de contaminantes. La síntesis de un compuesto que combine las propiedades de ambos materiales ofrece un gran potencial para el desarrollo de biomateriales avanzados y sistemas de purificación eficientes. En este contexto, se busca explorar métodos de síntesis para obtener un compuesto de hidroxiapatita y carbón activado con propiedades mejoradas y características específicas para

aplicaciones medioambientales.

4) *Método de coprecipitación:*

La coprecipitación es un proceso químico en el que dos o más reactivos se precipitan simultáneamente de una solución. En el caso de la síntesis de hidroxiapatita, se utilizan dos reactivos: una fuente de calcio y una fuente de fosfato. Para la preparación del compuesto, sería necesario adicionar al proceso de síntesis de hidroxiapatita, el carbón activado a la solución previamente activado[36], [44].

5) *Método de impregnación:*

El carbón activado se sumerge o impregna en una solución que contiene los precursores de la hidroxiapatita. Luego, se somete a un proceso de secado y calcinación para obtener el compuesto de hidroxiapatita y carbón activado.

6) *Método de deposición electroquímica:*

Se utiliza un electrodo de carbón activado y se sumerge en una solución que contiene los iones necesarios para la formación de la hidroxiapatita. Mediante la aplicación de una corriente eléctrica, se induce la deposición de la hidroxiapatita sobre la superficie del carbón activado [45], [46].

7) *Método de síntesis hidrotermal:*

Se lleva a cabo una reacción en una solución acuosa que contiene los precursores de la hidroxiapatita y se añade el carbón activado. La reacción se realiza a alta temperatura y presión controladas, lo que permite la formación del compuesto de hidroxiapatita y carbón activado[30], [32], [47], [48].

Método de impregnación en fase gaseosa: Se expone el carbón activado a una atmósfera de vapor o gas que contiene los precursores de la hidroxiapatita. Los precursores se adsorben en la superficie del carbón activado y, posteriormente, se somete a un tratamiento térmico para obtener el compuesto de hidroxiapatita y carbón activado [30], [32]–[36].

B. *Capacidad de adsorción de iones metálicos*

La HA adsorbe iones principalmente a través de interacciones electrostáticas y formación de enlaces químicos. La superficie de la HA proporciona sitios activos cargados negativamente, los cuales atraen cationes metálicos y otros contaminantes cargados positivamente. Además, la presencia de grupos fosfato e hidroxilo en su estructura permite la

formación de enlaces químicos fuertes con metales, lo que aumenta la estabilidad de los complejos adsorbidos. La hidroxiapatita como intercambiador iónico lleva una carga eléctrica "excedente" que es compensada por iones de signo opuesto, los llamados contra-iones [5]. En el caso de la HAp los iones Ca^{2+} . Pueden moverse libremente en la solución y pueden ser sustituidos por otros iones [49]–[54].

Por su parte, el CA adsorbe contaminantes mediante una combinación de mecanismos físicos y químicos. La alta porosidad y área superficial del CA proporcionan sitios de adsorción, donde los contaminantes pueden ser atrapados por fuerzas de Van der Waals y fuerzas electrostáticas. Además, la presencia de grupos funcionales superficiales en el CA, como hidroxilos y carboxilos, permite interacciones químicas como la formación de puentes de hidrógeno y enlaces covalentes, mejorando la adsorción de compuestos orgánicos [24], [26], [55], [56].

C. Aplicaciones del compuesto de carbón activado e hidroxiapatita

El composito puede ser utilizado como un medio de filtración en sistemas de tratamiento de agua. Las propiedades adsorbentes del carbón activado permiten la remoción de compuestos orgánicos, productos químicos tóxicos y contaminantes orgánicos persistentes, mientras que la hidroxiapatita ayuda a eliminar remover iones metálicos tóxicos, como plomo, cobre, cadmio, arsénico, entre otros y compuestos inorgánicos. Esto hace que el composito sea efectivo para la purificación de aguas afectada por diversos contaminantes [26]–[28], [50], [57].

El composito de carbón activado e hidroxiapatita puede aplicarse para la remoción de contaminantes de diversas maneras, dependiendo del tipo de contaminante y las características del sistema de tratamiento de agua. Algunas posibles aplicaciones son:

1) Columnas de lecho fijo

El composito puede utilizarse como material de relleno en columnas de lecho fijo. El agua contaminada fluye a través de la columna y los contaminantes son adsorbidos por el carbón activado y la hidroxiapatita a medida que el agua pasa por el lecho. Este método es efectivo para la remoción de una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

2) Filtros de cartucho

El composito puede ser utilizado en forma de cartuchos de filtro, que se instalan en sistemas de purificación de agua. Los cartuchos contienen el composito de carbón activado e hidroxiapatita, y el agua pasa a través del cartucho, donde los contaminantes son adsorbidos por el material del filtro. Este enfoque es particularmente útil para la remoción de contaminantes orgánicos y metales pesados.

3) Tratamiento en línea

El composito puede ser incorporado en sistemas de tratamiento de agua en línea, donde el agua fluye a través de una unidad que contiene el material adsorbente. Esto es especialmente útil en aplicaciones industriales o municipales donde se requiere una purificación continua del agua. El composito puede ser utilizado para la remoción de

contaminantes específicos, como metales pesados, compuestos orgánicos o productos químicos tóxicos.

4) Tratamiento en lotes

El composito puede ser utilizado en sistemas de tratamiento de agua en lotes, donde una cantidad específica de agua contaminada se trata por separado. El agua contaminada se mezcla con el composito en un recipiente y se agita durante un tiempo determinado para permitir la adsorción de los contaminantes. Posteriormente, el agua tratada se separa del composito y se recoge. Este método es adecuado para aplicaciones de menor escala o cuando se requiere un tratamiento puntual.

Es importante considerar que la eficacia del composito de carbón activado e hidroxiapatita en la remoción de contaminantes puede depender de factores como la concentración de los contaminantes, el tiempo de contacto, el pH del agua y otros parámetros específicos del sistema de tratamiento. Por lo tanto, es recomendable realizar pruebas y ajustes experimentales para optimizar la eficiencia de remoción en cada caso particular [1]–[6], [10]–[12], [16], [23], [24], [28], [50].

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio muestran una alta aplicabilidad tanto para el carbón activado como para la hidroxiapatita en la remoción de metales pesados en aguas contaminadas. Sin embargo, es importante destacar que existen algunas limitaciones y variaciones que se pueden presentar en la eficiencia de remoción, por tanto, se recomienda realizar estudios adicionales de su aplicabilidad como composito para determinar su alcance real. Asimismo, sería interesante investigar la combinación de diferentes adsorbentes en sistemas mixtos como el propuesto para aprovechar las ventajas de cada uno y mejorar aún más la eficiencia de remoción.

Por otra parte, a pesar de los avances en la utilización de carbón activado e hidroxiapatita en la remoción de metales pesados, aún existen lagunas en el conocimiento que requieren una mayor investigación. Por ejemplo, se necesita una mejor comprensión de la cinética de adsorción que proporciona el composito como material conformado por dos agentes adsorbentes de diferente origen. Además, es necesario investigar más a fondo la regeneración y reutilización de este adsorbente, así como evaluar su viabilidad a escala industrial.

V. CONCLUSIONES

En conclusión, esta revisión destaca el potencial del carbón activado e hidroxiapatita como adsorbentes eficientes para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas. Ambos materiales presentan propiedades únicas, como alta porosidad y área superficial, que les confieren una capacidad de adsorción significativa. La activación química se identificó como el método preferido debido a sus ventajas en términos de temperaturas de calentamiento más bajas, tiempos de procesamiento reducidos, porosidad controlada y alto rendimiento. Asimismo, se han identificado lagunas en el conocimiento actual que deben abordarse en futuras

investigaciones. Entre ellas se encuentran la comprensión detallada de los mecanismos de adsorción y la regeneración del composito.

En general, este artículo de revisión destaca el potencial de los materiales adsorbentes, como el carbón activado e hidroxiapatita, para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas.

REFERENCIAS

- [1] L. J. Fajardo Valderrama and F. Valderrama, "Remoción selectiva de metales pesados del agua residual Remoción selectiva de metales pesados del agua residual proveniente del proceso de decapado proveniente del proceso de decapado Citación recomendada Citación recomendada," 2014, Accessed: Jun. 29, 2023. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria
- [2] "Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico." http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000100010 (accessed Jun. 29, 2023).
- [3] "Vista de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión | Ingeniería y Región." <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/710/1359> (accessed Jun. 29, 2023).
- [4] E. Toribio Jiménez, "Estudio de la capacidad de los hidroxiapatitos como reactivos para la eliminación de metales," 2015, Accessed: Jun. 29, 2023. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/26366>
- [5] D. Ivan et al., "Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión Treatments for Removal of Heavy Metals Commonly Found in Industrial Wastewater. A Review," 2015.
- [6] L. J. Fajardo Valderrama and F. Valderrama, "Remoción selectiva de metales pesados del agua residual Remoción selectiva de metales pesados del agua residual proveniente del proceso de decapado proveniente del proceso de decapado Citación recomendada Citación recomendada," 2014. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria
- [7] M. Elkady, H. Shokry, and H. Hamad, "Microwave-Assisted Synthesis of Magnetic Hydroxyapatite for Removal of Heavy Metals from Groundwater," *Chem Eng Technol*, vol. 41, no. 3, pp. 553–562, Mar. 2018, doi: 10.1002/ceat.201600631.
- [8] S. T. Ramesh, N. Rameshbabu, R. Gandhimathi, P. V. Nidheesh, and M. Srikanth Kumar, "Kinetics and equilibrium studies for the removal of heavy metals in both single and binary systems using hydroxyapatite," *Appl Water Sci*, vol. 2, no. 3, pp. 187–197, 2012, doi: 10.1007/s13201-012-0036-3.
- [9] A. Avram, T. Frentiu, O. Horovitz, A. Mocanu, F. Goga, and M. Tomoaia-Cotisel, "Hydroxyapatite for removal of heavy metals from wastewater," *Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia*, vol. 62, no. 4, pp. 93–104, 2017, doi: 10.24193/subchem.2017.4.08.
- [10] M. S. Fernando, R. M. De Silva, and K. M. N. De Silva, "Synthesis, characterization, and application of nano hydroxyapatite and nanocomposite of hydroxyapatite with granular activated carbon for the removal of Pb²⁺ from aqueous solutions," *Appl Surf Sci*, vol. 351, pp. 95–103, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.apsusc.2015.05.092.
- [11] A. Vahdat, B. Ghasemi, and M. Yousefpour, "Synthesis of hydroxyapatite and hydroxyapatite/Fe₃O₄ nanocomposite for removal of heavy metals," *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 12, p. 100233, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.ENMM.2019.100233.
- [12] M. S. Fernando, R. M. De Silva, and K. M. N. De Silva, "Synthesis, characterization, and application of nano hydroxyapatite and nanocomposite of hydroxyapatite with granular activated carbon for the removal of Pb²⁺ from aqueous solutions," *Appl Surf Sci*, vol. 351, pp. 95–103, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.APSUSC.2015.05.092.
- [13] A. Avram, T. Frentiu, O. Horovitz, A. Mocanu, F. Goga, and M. Tomoaia-Cotisel, "Hydroxyapatite for removal of heavy metals from wastewater," *Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia*, vol. 62, no. 4, pp. 93–104, 2017, doi: 10.24193/subchem.2017.4.08.
- [14] A. A. Hamad, M. S. Hassouna, T. I. Shalaby, M. F. Elkady, M. A. Abd Elkawi, and H. A. Hamad, "Electrospun cellulose acetate nanofiber incorporated with hydroxyapatite for removal of heavy metals," *Int J Biol Macromol*, vol. 151, pp. 1299–1313, May 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.10.176.
- [15] A. Vahdat, B. Ghasemi, and M. Yousefpour, "Synthesis of hydroxyapatite and hydroxyapatite/Fe₃O₄ nanocomposite for removal of heavy metals," *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 12, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.enmm.2019.100233.
- [16] C. Carolina and C. Quijano, "Producción de carbón activado y sílice a partir de cascarilla de arroz - una revisión," *Scientia Et Technica*, vol. 18, no. 2, pp. 422–429, 2013, Accessed: Jun. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84929153019>
- [17] Y. Gao, Q. Yue, B. Gao, and A. Li, "Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 746, Elsevier B.V., Dec. 01, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141094.
- [18] I. A. W. Tan, A. L. Ahmad, and B. H. Hameed, "Preparation of activated carbon from coconut husk: Optimization study on removal of 2,4,6-trichlorophenol using response surface methodology," *J Hazard Mater*, vol. 153, no. 1–2, pp. 709–717, May 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.014.
- [19] Y. Gao, Q. Yue, B. Gao, and A. Li, "Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review," *Science of the Total Environment*, vol. 746, Elsevier B.V., Dec. 01, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141094.
- [20] I. A. W. Tan, A. L. Ahmad, and B. H. Hameed, "Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies," *J Hazard Mater*, vol. 154, no. 1–3, pp. 337–346, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.031.
- [21] J. H. Tay, X. G. Chen, S. Jeyaseelan, and N. Graham, "Optimising the preparation of activated carbon from digested sewage sludge and coconut husk."
- [22] C. A. Achury and C. Aden, "OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE COCO: OBTENCIÓN POR MEDIO DE ACTIVACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA."
- [23] M. V. Vidal, A. Rodríguez Suarez, K. M. Barrios, J. Ocampo Pérez, and W. B. Lara, "Potencial de residuos agroindustriales para la síntesis de Carbón Activado: una revisión," *Scientia et Technica*, ISSN 0122-1701, Vol. 23, No. 3, 2018, págs. 411-419, vol. 23, no. 3, pp. 411–419, 2018, Accessed: Jun. 29, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6760221&info=resumen&idioma=SPA>
- [24] M. Bastidas, L. M. Buelvas, M. I. Márquez, and K. Rodríguez, "Producción de Carbón Activado a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia," *Información tecnológica*, vol. 21, no. 3, pp. 87–96, 2010, doi: 10.4067/S0718-

- 07642010000300010.
- [25] A. P. Ramírez, S. Giraldo, E. Flórez, and N. Acelas, "Preparation of activated carbon from palm oil wastes and their application for methylene blue removal," *Revista Colombiana de Química*, vol. 46, no. 1, pp. 33–41, Jan. 2017, doi: 10.15446/REV.COLOMB.QUIM.V46N1.62851.
- [26] G. J. F. Cruz Cerro, M. V. Yucra, J. S. Contreras, J. L. Solís Veliz, M. M. Gómez León, and R. Keiski, "ESTUDIO DE CARBONES ACTIVADOS IMPREGNADOS CON QUITOSANO Y SU COMPARACIÓN CON CARBONES COMERCIALES," 2016.
- [27] D. Luna, A. González, M. Gordon, and N. Martín, "Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco."
- [28] M. Zięzio, B. Charmas, K. Jedynek, M. Hawryluk, and K. Kucio, "Preparation and characterization of activated carbons obtained from the waste materials impregnated with phosphoric acid(V)," *Applied Nanoscience (Switzerland)*, vol. 10, no. 12, pp. 4703–4716, Dec. 2020, doi: 10.1007/S13204-020-01419-6/TABLES/4.
- [29] R. De Janeiro, "Preparação E Caracterização De Hidroxiapatita," 2006.
- [30] H. Melero, J. Fernández, and J. M. Guilemany, "Recubrimientos bioactivos: Hidroxiapatita y titania," *Biomecánica*, vol. 19, pp. 35–48, 2011, [Online]. Available: <http://upcommons.upc.edu/revistes/handle/2099/12325>
- [31] S. I. Eguía Eguía, "ESTUDIO MICROESTRUCTURAL DE PARTÍCULAS DE HIDROXIAPATITA CRECIDAS SOBRE GELES DE SÍLICE," Universidad Autónoma de Nuevo León, 2009. [Online]. Available: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=ESTUDIO+MICROESTRUCTURALDE+PART%13ICULAS+DEHIDROXIAPATITA+CRECIDASSOBRE+GELES+DE+S%13ILICE>
- [32] Y. J. Mata Cocoltzi, "Caracterización estructural, microestructural y química durante el proceso para obtener Hidroxiapatita a partir de hueso de bovino," Thesis, p. 101, 2016.
- [33] E. Peón, A. Jiménez Morales, E. Fernández-Escalante, M. C. García-Alonso, M. L. Escudero, and J. C. Galván, "Recubrimientos de hidroxiapatita preparados mediante un proceso sol-gel," *Revista de Metalurgia*, vol. 41, no. Extra, pp. 479–482, 2005, doi: 10.3989/revmetalm.2005.v41.iextra.1080.
- [34] C. Peniche, Y. Solís, N. Davidenko, and R. García, "Materiales compuestos de quitosana e hidroxiapatita," *Biotecnología Aplicada*, vol. 27, no. 3, 2010.
- [35] S. I. Eguía, "Estudio microestructural de partículas de hidroxiapatita crecidas sobre geles de sílice," *Universida Autonoma de Nuevo leon*, vol. 1, p. 65, 2019.
- [36] J. L. A. T. FUENTES, "Obtención y caracterización de hidroxiapatita porosa a partir de cáscara de huevo y tunicia," 2010.
- [37] M. I. Ochoa Gómez, "Síntesis Y Caracterización De Polvos De Hidroxiapatita Carbonatada Tipo B Con Diferentes Contenidos De Carbonato," *Revista Colombiana de Materiales*, no. 17, pp. 22–32, 2021, doi: 10.17533/udea.rcm.n17a03.
- [38] Y. G. Morales, "SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA BIOACTIVIDAD DE BIOMATERIALES COMPUESTOS DE HIDROXIAPATITA CARBONATADA/HIDROXIAPATITA ESTEQUIOMÉTRICA DE ALTA CRISTALINIDAD," Universidad de Sonora, 2019.
- [39] C. A. Carvalho Zavaglia, R. F. Silva, S. A. Santos, and C. R. Pellicari de Lima, "Caracterización de recubrimientos de hidroxiapatita depositadas sobre la aleación Ti6Al7Nb a través de aspersión térmica a plasma," *Biomecánica*, vol. 8, no. 1, pp. 49–53, 2000, doi: 10.5821/sibb.v8i1.1646.
- [40] P. A. F. Sossa, B. S. Giraldo, B. C. G. Garcia, E. R. Parra, and P. J. A. Arango, "Comparative study between natural and synthetic Hydroxyapatite: structural, morphological and bioactivity properties," *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 23, no. 4, Dec. 2018, doi: 10.1590/s1517-707620180004.0551.
- [41] S. Marković et al., "Synthetical bone-like and biological hydroxyapatites: A comparative study of crystal structure and morphology," *Biomedical Materials*, vol. 6, no. 4, 2011, doi: 10.1088/1748-6041/6/4/045005.
- [42] S. M. Londoño-Restrepo, C. F. Ramirez-Gutierrez, A. del Real, E. Rubio-Rosas, and M. E. Rodriguez-García, "Study of bovine hydroxyapatite obtained by calcination at low heating rates and cooled in furnace air," *J Mater Sci*, vol. 51, no. 9, pp. 4431–4441, 2016, doi: 10.1007/s10853-016-9755-4.
- [43] A. Heredia, I. De F, I. De F, and C. De F, "Thermal analysis study of human bone," vol. 8, pp. 4777–4782, 2003.
- [44] B. Bazan et al., "Metodologías sintéticas para la obtención de compuestos de coordinación metal-orgánicos," *Macla. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, vol. 2, no. 16, pp. 162–163, 2012, doi: 10.1021/cr200304e.fig.
- [45] R. Uribe, A. Uvillús, L. Fernández, O. Bonilla, A. Jara, and G. González, "Electrochemical Deposition of Hydroxyapatite on Stainless Steel Coated with Tantalum/Tantalum Nitride Using Simulated Body Fluid as an Electrolytic Medium," *Coatings*, vol. 12, no. 4, Apr. 2022, doi: 10.3390/coatings12040440.
- [46] S. Ban and S. Maruno, "Morphology and microstructure of electrochemically deposited calcium phosphates in a modified simulated body fluid," 1998.
- [47] K. Q. Alvarez, "Síntesis de cordierita a partir de hidroxihidrogeles bajo tratamiento hidrotermal.," pp. 1–110, 2012.
- [48] A. Ruffini, S. Sprio, L. Preti, and A. Tampieri, "Synthesis of Nanostructured Hydroxyapatite via Controlled Hydrothermal Route," *Biomaterial-supported Tissue Reconstruction or Regeneration*, May 2019, doi: 10.5772/INTECHOPEN.85091.
- [49] Pranoto, T. Martini, F. Astuti, and W. Maharditya, "Test the Effectiveness and Characterization of Quartz Sand/Coconut Shell Charcoal Composite as Adsorbent of Manganese Heavy Metal," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 858, no. 1, Jul. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/858/1/012041.
- [50] R. P., S. P., and S. S., "Preparation and characterization of activated carbons derived from palmyra waste of coastal region, in: Proceedings of International Conference on "Impact of Climate Change on Coastal Ecosystem." 2011.
- [51] M. J. Rampe, I. R. S. Santoso, H. L. Rampe, V. A. Tiwow, and A. Apita, "Infrared Spectra Patterns of Coconut Shell Charcoal as Result of Pyrolysis and Acid Activation Origin of Sulawesi, Indonesia," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132808008.
- [52] Z. M. Lazim, T. Hadibarata, M. H. Puteh, and Z. Yusop, "Adsorption characteristics of bisphenol a onto low-cost modified phyto-waste material in aqueous solution," *Water Air Soil Pollut*, vol. 226, no. 3, 2015, doi: 10.1007/s11270-015-2318-5.
- [53] V. Uskoković, "Ion-doped hydroxyapatite: An impasse or the road to follow?," *Ceram Int*, vol. 46, no. 8, pp. 11443–11465, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.02.001.
- [54] D. N. Ungureanu, N. Angelescu, R. M. Ion, E. V. Stoian, and C. Z. Rizescu, "Synthesis and characterization of hydroxyapatite nanopowders by chemical precipitation," 10th WSEAS International Conference on EHAC'11 and ISPRA'11, 3rd WSEAS Int. Conf. on

Nanotechnology, Nanotechnology'11, 6th WSEAS Int. Conf. on ICOAA'11, 2nd WSEAS Int.Conf. on IPLAFUN'11, no. September 2015, pp. 296–301, 2011.

- [55] X. Zhang, S. Wu, Y. Liu, Z. Wang, H. Zhang, and R. Xiao, “Removal of Cr(VI) from aqueous solution by Rice-husk-based activated carbon prepared by Dual-mode heating method,” *Carbon Resources Conversion*, vol. 6, no. 2, pp. 76–84, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.CRCON.2023.01.003.
- [56] X. Y. Liu et al., “Preparation of a carbon-based solid acid catalyst by sulfonating activated carbon in a chemical reduction process,” *Molecules*, vol. 15, no. 10, pp. 7188–7196, Oct. 2010, doi: 10.3390/molecules15107188.
- [57] D. Luna, A. González, M. Gordon, and N. Martín, “Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco.”