

Síntesis verde de nanopartículas de óxido de hierro empleadas para la retención de mercurio presente en aguas

Green synthesis of iron oxide nanoparticles used for the retention of mercury present in water

Rodrigo Sarria-Villa^{1,*}, José Gallo-Corredor¹, Santiago Pabón¹

(1) Grupo de Investigación en Química Analítica Ambiental GIQA, Departamento de Química, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, Calle 5 # 4-70

*autor de correspondencia (rodrigosv@unicauca.edu.co)

Recibido 17/10/2025

Evaluado 02/01/2026

Aceptado 19/03/2026

<https://doi.org/10.65093/aci.v17.n1.2026.47>

RESUMEN

En el presente estudio, se llevó a cabo la optimización de la síntesis de nanopartículas de hierro, que utilizó un extracto acuoso de follaje de *Eucalyptus grandis*, el cual fue usado junto con una sal de cloruro de hierro (II) tetrahidratado y una sal de cloruro de hierro (III) hexahidratado usando agua como solvente, además de una solución básica de hidróxido de sodio. Las nanopartículas se precipitaron, filtraron y secaron, encontrándose un rendimiento del 98.99%. Las nanopartículas sintetizadas mostraron una superficie específica de 131.90 m²/g. Se realizó un análisis de sus grupos funcionales mediante la técnica de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (IR-TF) y el tamaño de partícula se determinó por medio de microscopía electrónica de transmisión (MET). Se evaluó y valoró el comportamiento de las nanopartículas sintetizadas durante la retención de Hg (II). La isoterma de adsorción se ajustó al modelo de Freundlich, típica de un modelo de adsorción heterogénea, cuya máxima capacidad de adsorción para Hg(II) fue alcanzada en 274.92 mg Hg/g de nanopartícula. La partícula si presentó un buen porcentaje de retención para el mercurio (79.26%) presente en aguas, además de que esta partícula sintetizada reduce la necesidad de reactivos para su preparación, no genera residuos contaminantes y demanda un costo energético bajo.

Palabras clave: adsorción, metales pesados, contaminación, biomasa, nanopartícula

ABSTRACT

In this study, the synthesis of iron nanoparticles was optimized using an aqueous extract of *Eucalyptus grandis* foliage, which was used together with iron (II) chloride tetrahydrate salt and iron (III) chloride hexahydrate salt using water as a solvent, in addition to a basic sodium hydroxide solution. The nanoparticles were precipitated, filtered, and dried, achieving a yield of 98.99%. The synthesized nanoparticles exhibited a specific surface area of 131.90 m²/g. Their functional groups were analyzed using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and particle size was determined by transmission electron microscopy (TEM). The behavior of the synthesized nanoparticles during Hg(II) retention was evaluated and assessed. The adsorption isotherm fit the Freundlich model, typical of a heterogeneous adsorption model, with a maximum adsorption capacity for Hg(II) of 274.92 mg Hg/g of nanoparticle. The particle exhibited a good retention percentage for mercury (79.26%), and this synthesized particle reduces the need for reagents in its preparation, generates no polluting waste, and requires low energy input.

Keywords: adsorption, heavy metals, pollution, water, biomass, nanoparticle

INTRODUCCIÓN

La obtención de adsorbentes de menor tamaño se ha vuelto altamente atractiva debido a las mejoradas características de estos materiales adsorbentes al presentar propiedades muy superiores sobre sus homónimos de mayor tamaño, tales como mejores propiedades ópticas, magnéticas, además de mayor área superficial lo que se traduce en una mayor interacción con el analito de interés (García, 2015; Mohmood *et al.*, 2016; Stan *et al.*, 2017). Además, el uso de la biomasa como el follaje de eucalipto, como un componente en la síntesis de nanopartículas, tiene una ventaja bastante destacable a nivel de la química verde al reducir la necesidad de reactivos para la obtención de las nanopartículas, además de que la biomasa puede ejercer varias funciones a lo largo de la síntesis, desde un sistema con capacidad de interaccionar con diferentes sustancias, hasta ser parte del efecto estabilizante del núcleo ya que muchas de estas partículas tienden a ser considerablemente inestables al aire y la falta de un estabilizante lleva a la modificación del material y la pérdida de sus propiedades (García, 2015; Najafi *et al.*, 2021; Strano *et al.*, 2026). En particular, en Colombia el follaje de *Eucalyptus grandis* es un residuo forestal, abundante, que puede utilizarse en función de desarrollar un adsorbente, particularmente por su alto contenido de fenoles, compuesto ideal a la hora de la síntesis de materiales como las nanopartículas debido a que sirven tanto como complejante con los iones metálicos, así como un agente estabilizante e incluso como agente reductor si se llegase a dar el caso de necesitar de uno durante el proceso de síntesis (García, 2015; Najafi *et al.*, 2021; Rakhimol *et al.*, 2020; Salim *et al.*, 2025).

En la actualidad, se encuentran en práctica diversos procesos para la descontaminación de aguas, y se han informado muchas alternativas en la literatura para la recuperación efectiva de metales pesados (Mohmood *et al.*, 2016; Rajamani & Rajendrakumar, 2019; Zhang *et al.*, 2020; Pabón *et al.*, 2020; Sanchez *et al.*, 2025), entre los cuales se encuentran la precipitación de metales por formación de hidróxidos y la adsorción de metales, que se usan ampliamente debido a su rapidez y efectividad. Sin embargo, varios inconvenientes tales como el alto costo, el uso de disolventes tóxicos y la liberación de productos químicos ambientalmente inaceptables, están asociados a estas técnicas de extracción para metales pesados (Carolin *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2020). Desde esta perspectiva, varios estudios se centran en desarrollar adsorbentes para la separación de metales, partiendo de una variedad de desechos de biomasa, ya que son de bajo costo, ambientalmente benignos, biodegradables y renovables (Costa *et al.*, 2019; Gurung *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2017). Los estudios han demostrado que la simple modificación química de la biomasa cruda puede aumentar la capacidad de adsorción, así como aumentar su resistencia mecánica y reutilización (Choudhary *et al.*, 2018; García *et al.*, 2015; Huang *et al.*, 2010). La adsorción es un método eficaz y además ampliamente utilizado para la captación de iones metálicos como el mercurio de diferentes soluciones acuosas obteniendo porcentajes de hasta 90% (Ersan *et al.*, 2017; Ewecharoen *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2013).

El mercurio se considera un contaminante global debido a su alta toxicidad, bioacumulación y persistencia en el ambiente. China en los últimos 30 años llegó a emitir unas 2151 toneladas de Hg, así mismo en Colombia al emisión de Hg llegó a las 1470 toneladas debido a sus diferentes actividades antropogénicas donde el mercurio es utilizado abundantemente (Budnik & Casteleyn, 2019; Gutiérrez-Mosquera *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2018). Para satisfacer la creciente demanda de descontaminación, también se debe emprender la recuperación de mercurio presente en aguas residuales de varias industrias mineras auríferas, así como también en las grandes cantidades de sedimentos procedentes de la industria minera del oro. Una mejor alternativa en este sentido es desarrollar técnicas de liosorción ecológicas y rentables que utilicen biomasa para recuperar el metal de los residuos (Fu & Wang, 2011; Rajamani & Rajendrakumar, 2019).

En Colombia, niveles de mercurio presentes tanto en agua como en sedimentos han llegado a valores de hasta 303.70 µg/L y 1.00 mg/L respectivamente, por lo cual también se han establecido límites máximos permisibles de mercurio mucho menores de alrededor de 2.00 µg/L en aguas residuales de actividades mineras (República de Colombia y Congreso, 2013; República de Colombia y Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2012).

Por lo tanto, en esta investigación, se llevó a cabo la optimización de la síntesis de nanopartículas de óxido de hierro usando un extracto acuoso obtenido del follaje de *Eucalyptus grandis* y se exploró su posible utilización como material adsorbente activo para la retención de mercurio presente en medios acuosos.

METODOLOGÍA

Preparación de la nanopartícula

Se recurrió al método de coprecipitación donde se usaron dos sales de hierro, cloruro de hierro (II) tetrahidratado ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) y cloruro de hierro (III) hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) teniendo en cuenta la relación en las cantidades de 0.2650 g y 0.5550 g respectivamente en 100 mL de agua desionizada. Se calentó a 87°C por 10 minutos con agitación constante, tras los cuales se adicionó un volumen de 0.8 mL del extracto de hojas de eucalipto preparado previamente tornándose la solución ligeramente marrón y luego de 5 minutos se le adicionó 20 mL de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1.7 M, obteniéndose una solución de coloración negra. La nanopartícula obtenida se dejó precipitar, se filtró y se secó en el horno a 50°C por 24 horas. Finalmente, con la nanopartícula seca se maceró y se almacenó para su posterior uso en los ensayos de adsorción (Awwad & Salem, 2013; Stan *et al.*, 2017).

Caracterización de la nanopartícula

La caracterización de la partícula se realizó mediante análisis instrumental usando las técnicas de Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) con un equipo JEOL JEM 1200-EX. Los espectros se tomaron por espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (IR-TF) con pastilla de KBr usando un equipo Thermo® IR-Nicolet iS10. Los análisis del área superficial se realizaron con la isoterma de Brunauer-Emmett-Teller (BET) usando un equipo Nova 1000e Quantachrome.

Viabilidad de la partícula como retenedora de Hg en agua

Para estudiar la capacidad retenedora de mercurio, se empleó un estándar de mercurio (II) certificado de 1000 mg/L, a partir del cual se preparó una solución estándar de 1.0 mg/L con la cual se prepararon las soluciones para los diferentes ensayos. Estas soluciones se pusieron en contacto con la partícula de magnetita y después de haber alcanzado el tiempo de equilibrio, se filtraron, se les hizo digestión ácida y se determinó la concentración de mercurio por espectrometría de absorción atómica por la técnica de vapor frío con el fin de determinar el porcentaje de adsorción de mercurio por parte de las nanopartículas (Mohmood *et al.*, 2016; Tavares *et al.*, 2013).

Isoterma de adsorción

Para determinar el tipo de interacciones de la partícula con el analito, se realizó el ensayo de la isoterma de adsorción en el que se tomaron volúmenes constantes de soluciones de mercurio de 10 mL a diferentes concentraciones (15 a 500 $\mu\text{g/L}$), y se le adicionaron a una cantidad de adsorbente de 5.5 mg, la mezcla se agitó hasta alcanzar el equilibrio. Luego del equilibrio, se tomaron alícuotas de 0.5 mL, se aforó a 25 mL, luego se le realizó digestión y se determinó la concentración de mercurio por EAA-VF.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Microscopía electrónica de transmisión (MET)

Para la determinación del tamaño de la nanopartícula se empleó la microscopía electrónica de transmisión (MET), se obtuvo que el tamaño promedio de la nanopartícula es de aproximadamente 8.97 nm, además de una morfología de tipo semicircular. La fig. 1 muestra la micrografía obtenida para la partícula sintetizada en el rango de los nanómetros. En algunos de los casos se puede apreciar un mayor grado de aglomeración, aunque los mismos no superan los 25 nm. Con el tamaño de las nanopartículas determinado se puede conjeturar tempranamente que, gracias a su reducido tamaño, el área de contacto que presenta será mayor y por lo tanto el número de interacciones entre la superficie de la nanopartícula y el analito de interés será mayor. Los resultados del área superficial se comprueban por medio de los análisis con la técnica del BET.

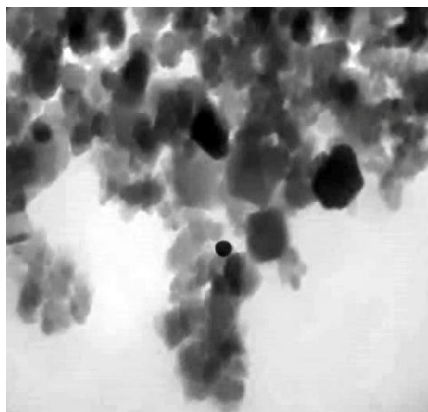


Fig. 1: Microscopía electrónica de transmisión de la nanopartícula de magnetita.

Espectroscopía infrarroja

Para determinar los grupos funcionales presentes en la nanopartícula sintetizada de magnetita, se realizó un análisis por la técnica de espectroscopía de infrarrojo (IR), usando un espectrofotómetro de IR. Esta técnica se puede aplicar para la identificación de los grupos funcionales superficiales, lo cual es importante para tener una idea general de la estructura química de las posibles biomoléculas que son responsables del recubrimiento y estabilidad de la nanopartícula (Awwad & Salem, 2013; Stan *et al.*, 2017). En este caso, se encontraron diversos grupos funcionales sobre la partícula, en la fig. 2 se observa el espectro IR de la nanopartícula sintetizada el cual muestra que alrededor de los 3440.77 cm^{-1} se encuentra una banda de estiramiento del grupo hidroxilo (-OH), aunque en el espectrograma la banda se encuentra bastante atenuada, del mismo modo se puede ver una banda a 1559.26 cm^{-1} , la cual hace referencia al estiramiento del enlace del grupo carbonilo (-CO). La presencia de las nanopartículas de magnetita puede verse por la aparición de una banda a los 445.31 cm^{-1} , la cual corresponde a la banda de estiramiento del enlace Fe-O del núcleo de la magnetita (Awwad & Salem, 2013; Stan *et al.*, 2017).

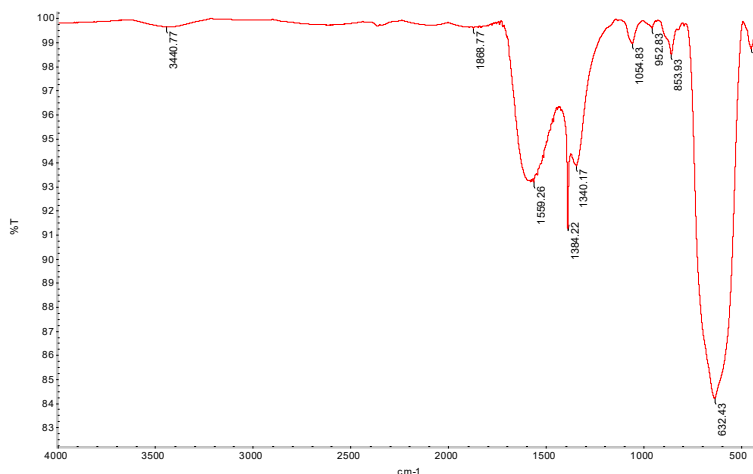


Fig. 2: Espectro IR de la nanopartícula de magnetita sintetizada.

Con estos resultados se puede establecer que el grupo carboxilo ($-\text{COO}^-$) ha interactuado con el núcleo, enlazándose en la superficie de la partícula de magnetita. De estos resultados y con base a los estudios realizados por García (2015), se puede inferir que los polifenoles del extracto de eucalipto han interactuado con la partícula actuando como agente reductor y estabilizador para la nanopartícula de magnetita (García, 2015; Awwad & Salem, 2013; Stan *et al.*, 2017).

Análisis BET

Para la determinación del área superficial de la partícula se llevó a cabo un análisis por medio de una isoterma tipo II para BET del cual se obtuvo que el área superficial estimada para la partícula es de 131.90 m²/g de nanopartícula de magnetita, lo cual corrobora la primera hipótesis que plantea la microscopia electrónica de transmisión sobre la gran superficie de contacto del material nanoparticulado debida a su reducido tamaño y que se corrobora al comparar con los resultados obtenidos por Stan *et al.* (2017), el cual para nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas de manera similar obtuvo áreas superficiales para las nanopartículas de 187.40 m²/g de nanopartícula según los ensayos de BET (Stan *et al.*, 2017), por lo cual se puede esperar que para esta nanopartícula, en específico la adsorción del mercurio, sea relativamente alta gracias a la mayor interacción resultante entre el material adsorbente y el analito de interés.

Isoterma de adsorción

La isoterma de adsorción se estudió variando las concentraciones de mercurio inicial en la solución de prueba. Para lo cual se graficó la concentración en el equilibrio dada en µg/L contra la cantidad del metal adsorbido por la nanopartícula (q) expresada en mg/g que se calcula según la ecuación 1.

$$q = \frac{C_i - C}{w} * V \quad (1)$$

Donde C_i (µg/L) y C (µg/L) son la concentración del metal en la solución de prueba, antes y después de la adsorción respectivamente, w (g) y V (L) indican el peso seco de la partícula y el volumen de la solución de prueba respectivamente. Como se observa en la fig. 3, es evidente que la cantidad de retención de mercurio se incrementa a mayores concentraciones del metal en solución con tendencia a un valor constante a concentraciones superiores de 250 mg de Hg/g de adsorbente.

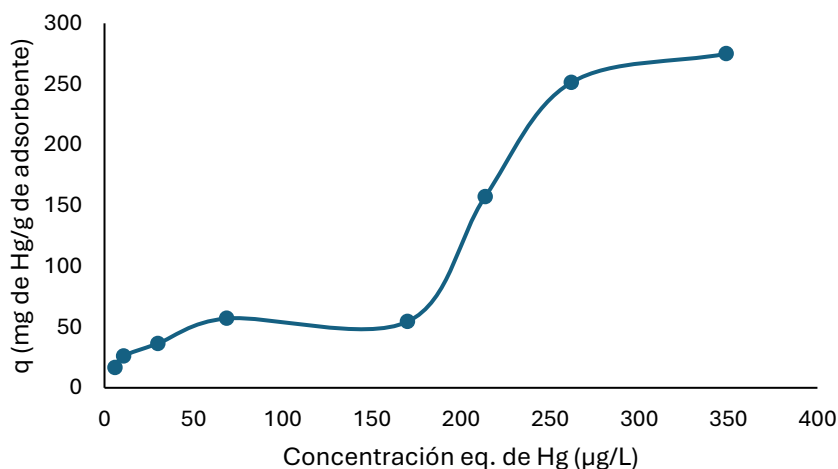


Fig. 3: Isoterma de adsorción de Hg (II) sobre la nanopartícula de magnetita a 25 °C.

De los resultados experimentales obtenidos del equilibrio se determinaron los parámetros de los modelos de isoterma de Langmuir y Freundlich. Los resultados de la retención del mercurio en las nanopartículas fueron linealizados teniendo en cuenta las ecuaciones de los modelos de las isotermas estudiadas, la fig. 4 muestra los resultados de la linealización por ambos modelos, donde el valor del índice de correlación (R²) juega un papel importante en la determinación del modelo más ajustado al proceso de adsorción conforme este valor se acerque a 1 y por ende permite discernir si la adsorción sobre las nanopartículas es de tipo físico o químico.

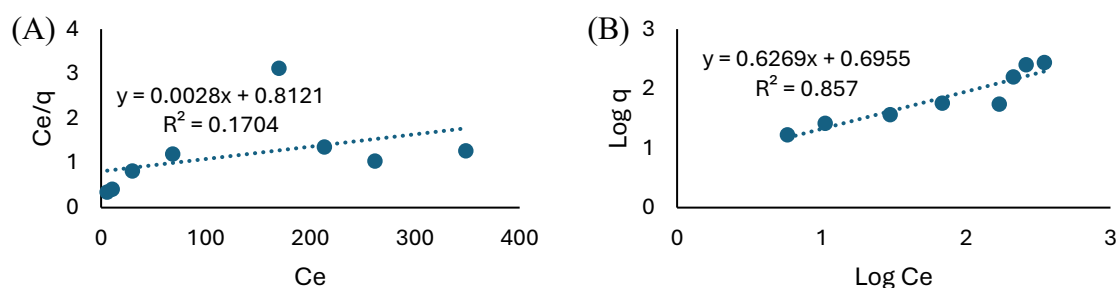


Fig. 4: Isotermas de adsorción de Hg (II) sobre la nanopartícula según el modelo de (A) Langmuir, (B) Freundlich.

Del mismo modo se usan las ecuaciones 2 y 3 que representan las ecuaciones linealizadas de ambos modelos para determinar los valores de las constantes de cada caso, valores que se muestran en la tabla 1.

$$\text{Langmuir: } \frac{Ce}{q} = \frac{1}{q_m \cdot b} + \frac{Ce}{q_m} \quad (2)$$

$$\text{Freundlich: } \text{Log } q = \text{Log } K_f + \frac{1}{n} \text{Log } Ce \quad (3)$$

Donde en el caso de la ecuación de Langmuir en la fig. 4(A), C_e ($\mu\text{g/L}$) y q (mg/g) representan la concentración en el equilibrio de ion metálico en la fase líquida y la cantidad de ion metálico retenido por unidad de masa de adsorbente respectivamente, mientras que q_m y b son las constantes relacionadas con la máxima capacidad de sorción para una monocapa completa (mg/g) y con la afinidad entre el adsorbente y el adsorbato (L/mg), respectivamente (Parra, 2017). En el caso de la ecuación de Freundlich en la fig. 11(B), C_e y q tienen el mismo significado que, en el caso de Langmuir, mientras que K_f y $1/n$ hacen referencia a las constantes de equilibrio (mg/g) y la afinidad entre el adsorbente y el adsorbato (L/mg) respectivamente (Parra, 2017).

Tabla 1: Resultados de la adsorción de Hg sobre la nanopartícula de magnetita para las isotermas de Langmuir y Freundlich.

Modelo de Langmuir			Modelo de Freundlich		
q_m (mg/g)	b (L/mg)	R^2	K_f (mg/g)	$1/n$ (L/mg)	R^2
357.14	0.003	0.1704	4.96	0.6269	0.857

De los resultados obtenidos, se encuentra que el valor de los coeficientes de correlación (R^2) permite inferir la favorabilidad sobre la superficie del adsorbente preparado y por lo tanto indica el tipo de isoterma y los cálculos que se deben realizar. Se debe tener en cuenta que el valor del R^2 debe ser lo más cercano a uno para ser favorable (Laguna, 2014). Comparando los resultados obtenidos de los dos modelos, se encuentra que para la retención de Hg(II), se obtuvo el mejor ajuste bajo el modelo de Freundlich, con valores de R^2 de 0.857 en comparación con el modelo de Langmuir el cual presenta un valor para R^2 de 0.1704. Bajo el análisis de estos resultados se puede inferir que para los datos de la isoterma de adsorción de Hg (II) el modelo que mejor describe el comportamiento en el rango de concentraciones estudiadas es el modelo de Freundlich. Este modelo permite determinar que la superficie adsorbente es de hecho de tipo heterogénea, lo cual indica que hay muchos sitios disponibles para la adsorción, es decir que el número de grupos funcionales presentes sobre la superficie de la partícula es mayor y más variado por lo cual es más probable que se dé una mayor interacción y por ende una mayor probabilidad de retención por parte de dichos grupos del analito en la nanopartícula de magnetita sintetizada usando el extracto de *Eucalyptus grandis* (Rivas et al., 2014). De esta manera y analizando la constante de afinidad entre el adsorbente y el adsorbato ($1/n$) del modelo de Freundlich cuyo valor estimado es de 0.6269, se pudo determinar el factor de heterogeneidad (n), el cual presenta un valor de 1.60. El valor encontrado para n es mayor a uno, lo cual sugiere que, para la interacción entre el adsorbente y el adsorbato, el proceso se da mediante una adsorción física de los iones metálicos sobre la superficie de la partícula, además de que el modelo de isoterma de Freundlich permitió establecer que la interacción entre la partícula y el analito se da mediante un efecto de multicapa (Rivas et al., 2014; Zhang et al., 2023).

Retención de Hg (II) por la partícula de óxido de hierro

La retención del mercurio sobre la nanopartícula de 79.26% se debe en primera instancia a los grupos orgánicos que se encuentran sobre la misma tales como, los hidroxilos o carbonilos de los polifenoles y que interactúan con los iones del analito, debido a que se considera que el mercurio es un material diamagnético, es decir no presenta una interacción favorable con los campos magnéticos y por consiguiente el mercurio no debería de interactuar con el núcleo de la partícula como tal (Nguyen *et al.*, 2021). Incluso pese a que en el medio el mercurio se encuentra ionizado en la forma de Hg^{2+} , el diamagnetismo del elemento se mantiene pues los dos electrones que ha perdido pertenecen al orbital s manteniendo todos sus electrones en el orbital d apareados y conservando así su diamagnetismo, permitiendo la interacción entre el analito y la superficie de la partícula solo mediante interacciones electrostáticas, es decir una interacción física como se demostró previamente. Sin embargo, se debe considerar que la nanopartícula de óxido de hierro sintetizada presenta un comportamiento muy particular en sus propiedades debido a que los dos iones de hierro presentes en el sistema tienen momentos magnéticos desiguales y antiparalelos, y se le considera una partícula de tipo ferrimagnética (Noval *et al.*, 2017). Debido a este comportamiento tan particular, se sabe que el momento magnético neto de la partícula es débil debido a la configuración antiparalela, sin embargo, no llega a cero debido a la desigualdad en los momentos magnéticos individuales (Martínez, 2006). Entonces se puede considerar que el proceso global de retención del mercurio en solución por parte de la partícula de magnetita es de hecho un efecto combinado entre el núcleo de la misma y la capacidad de retención de su superficie, donde, debido al comportamiento diamagnético del metal este se verá repelido por el núcleo permitiendo una mayor movilización de los iones en la solución, lo cual se traduce en una mayor número de interacciones entre el metal y la superficie orgánica del sistema y dado que el momento magnético neto de la magnetita debido a sus propiedades ferrimagnéticas es débil, si bien tiene suficiente fuerza para causar la movilización por repulsión de los iones, no es lo suficientemente fuerte como para evitar la interacción de los mismos sobre su superficie donde la interacción electrostática entre los iones cargados de mercurio y los grupos orgánicos más electronegativos permitiendo la retención de los iones por parte de estos grupos orgánicos presentes en la superficie. Posteriormente y gracias a la alta susceptibilidad magnética de las partículas, estas se pueden extraer del medio acuoso en el que trabajan por medio de la acción de un campo magnético externo llevándose con ellas todo el mercurio que se ha logrado capturar durante el proceso, limpiando y descontaminando las aguas (Mohmood *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

A partir del extracto acuoso de follaje de *Eucalyptus grandis* se logró la optimización de la reacción de síntesis de nanopartículas de magnetita, con un porcentaje de rendimiento que alcanzó el 98.99%, logrando obtener nanopartículas con una gran área superficial de 131.90 m²/g, ideales para el proceso de adsorción. Por medio del estudio de las isotermas de adsorción, se determinó la capacidad de adsorción de Hg (II) de las nanopartículas, luego de alcanzar el tiempo de equilibrio (12 horas), estableciendo dicha capacidad en 274.92 mg de Hg (II)/g de nanopartícula, lo cual se ajusta al modelo de Freundlich, por tanto, para las nanopartículas sintetizadas el proceso de adsorción es de tipo físico. La nanopartícula sintetizada presentó una capacidad de retención de mercurio de un 79.26%.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Cauca y al departamento de Química, al Grupo de Investigación en Química Analítica Ambiental (GIQA), a la Unidad de Análisis Industrial (UAI) y al laboratorio de Microscopía de la Universidad del Cauca.

REFERENCIAS

- Awwad, A.M., & Salem, N.M. (2013). A green and facile approach for synthesis of magnetite nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, 8 (1), 1-6. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-266>
- Budnik, L.T. & Casteleyn, L. (2019). Mercury pollution in modern times and its socio-medical consequences. *Science of the Total Environment*, 654, 720-734. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.408>

- Carolín, C.F., Kumar, P.S., Saravanan, A., Joshiba, G.J. & Naushad, M. (2017). Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5 (3), 2782-2799. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.029>
- Choudhary, M., Kumar, R. & Neogi, S. (2018). Activated biochar derived from *Opuntia ficus-indica* for the adsorption of Hg(II). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6 (4), 5265-5276. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.016>
- Costa, J.A.S., Sarmento, V.H.V., Romão, L.P.C. & Paranhos, C.M. (2019). Adsorption of heavy metals from aqueous solutions using agricultural wastes: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 24541-24556. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05801-6>
- Ersan, G., Apul, O.G., Perreault, F. & Karanfil, T. (2017). Adsorption of organic contaminants by graphene nanosheets: A review. *Water Research*, 126, 385-398. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.010>
- Ewecharoen, A., Thiravetyan, P. & Nakbanpote, W. (2009). Comparison of nickel adsorption from aqueous solution by various plant residues. *Journal of Hazardous Materials*, 171 (1-3), 335-339. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.008>
- Fu, F. & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management*, 92 (3), 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- García, I.N. (2015). “*Síntesis verde de nanopartículas para la eliminación de colorantes en medios acuosos*”. Universidad de la Coruña. <https://ruc.udc.es/entities/publication/2ff9b452-ebe1-4760-88b4-deb46623f1b1>
- García, J.C., Pérez, A. & Ríos, L.A. (2015). Biomass-derived materials for heavy metal adsorption. *Bioresource Technology*, 196, 706-713. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.023>
- Gurung, M., Adhikari, B.B., Alam, S., Kawakita, H., Ohto, K., Inoue, K., et al. (2011). Removal of As(III) from aqueous solution by adsorption onto orange waste. *Journal of Hazardous Materials*, 185 (1), 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.113>
- Gutiérrez-Mosquera, H., Sujitha, S.B., Jonathan, M.P., Sarkar, S.K., Medina-Mosquera, F. & Ayala-Mosquera, H. (2018). Mercury levels in sediments from Colombian aquatic ecosystems. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7426-3>
- Huang, Y., Wu, D., Wang, X., Huang, W., Lawless, D. & Feng, X. (2010). Removal of heavy metals from water using polyvinylamine modified cellulose. *Journal of Hazardous Materials*, 173 (1-3), 538-546. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.090>
- Laguna, M.F. (2014). *Procesos de adsorción en sistemas ambientales*. Editorial Universitaria.
- Martínez, J. L. (2006). *Introducción al magnetismo de los sólidos*. Editorial Reverté.
- Mohmood, I., Lopes, C.B., Lopes, I., Ahmad, I., Duarte, A.C. & Pereira, E. (2016). Nanoscale materials and their use in water contaminants removal—A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 16807-16829. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6561-1>
- Najafi, M., Yousefi, Y. & Rafati, A. A. (2021). Green synthesis of metal nanoparticles using plant extracts. *Materials Chemistry and Physics*, 263, 124321. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124321>
- Noval, V.E., Carriazo, J.G. & Moreno, S. (2017). Ferrimagnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis and applications. *Applied Surface Science*, 425, 556-567. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.222>

- Nguyen, M.D., Tran, H.V., Xu, S. & Lee, T.R. (2021). Fe₃O₄ Nanoparticles: Structures, Synthesis, Magnetic Properties, Surface Functionalization, and Emerging Applications. *Appl Sci (Basel)*. <https://doi.org/10.3390/app112311301>
- Pabón, E., Rodríguez, M. & Herrera, A. (2020). Heavy metal removal from mining wastewater using bioadsorbents. *Journal of Environmental Management*, 260, 110066. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110066>
- Parra, J. A. (2017). “Adsorción de cromo y plomo en materiales lignocelulosos”. Universidad. del Cauca, trabajo de grado en Química. pp. 1-78. <https://repositorio.unicauca.edu.co/handle/123456789/4250>
- Rajamani, S., & Rajendrakumar, K. (2019). Adsorptive removal of mercury using low-cost materials. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 12, 100232. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100232>
- Rakhimol, K. R., Sulaiman, M. & Prasad, A. (2020). Role of polyphenols in nanoparticle synthesis. *Journal of Molecular Liquids*, 302, 112533. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112533>
- República de Colombia & Congreso de la República. (2013). *Ley 1658 de 2013: Disposiciones para la reducción y eliminación del uso del mercurio*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=53781>
- República de Colombia & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Resolución 1514 de 2012: Normas sobre vertimientos*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1514-de-2012/>
- Rivas, B.L., Pereira, E.D. & Moreno-Villoslada, I. (2014). Water-soluble polymer-metal ion interactions. *Progress in Polymer Science*, 39 (1), 114-140. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.08.002>
- Salim, S., Hari, N., Sudhi, S. & Nair, A. (2025). Green synthesis, characterisation and bioactivity of iron oxide nanoparticles using *Myristica fragrans* leaf extract. *The Microbe*, 8, 100481, <https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100481>.
- Sanchez, H., Malca, J., Zambrano, M., Calderón, H., Guamán-Andrade, A., Anilema, L., et al. (2025). Green synthesis of iron nanoparticles from *Pouteria caimito*: An effective adsorbent for mercury (Hg) in aqueous solutions. *Results in Materials*, 28, 100784, <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100784>
- Song, X., Cheng, I. & Lu, J. (2018). Annual atmospheric mercury emissions in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 16605-16620. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16605-2018>
- Stan, M., Popa, A., Toloman, D. & Katona, G. (2017). Green synthesis of magnetite nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 52, 12421-12432. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1390-5>
- Strano, V., Torrisi, V., Boninelli, S. & Miritello, M. (2026). Amorphous to crystalline phase transition in iron oxide nanoparticles prepared by Aloe vera assisted green synthesis. *Advanced Powder Technology*, 37 (1), 105154, <https://doi.org/10.1016/j.appt.2025.105154>
- Tavares, D.S., Lopes, C.B. & Pereira, E. (2013). Mercury removal from water by adsorption. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1702-6>
- Wang, J., Chen, C. & Xu, Z. (2017). Biosorbents for heavy metals removal. *Biotechnology Advances*, 35 (5), 603-617. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.06.004>

- Yin, P., Xu, Q., Qu, R., Zhao, G. & Sun, Y. (2013). Adsorption of transition metal ions from aqueous solutions onto activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 260, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.05.010>
- Zhang, J., Li, Y., Zhang, C., Jing, Y. & Zhang, R. (2020). Removal of heavy metals from wastewater. *Chemosphere*, 246, 125788. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125788>
- Zhang, Z; Ji Li, Zhang, X. (2023). Rapid removal of low concentration Hg(II) from water by iron nanoparticles: Excellent performance and unique mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144643, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144643>