

ESTUDIO DE LA ADSORCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA MEDIANTE EL USO DEL NANOCOMPÓSITO BASADO EN NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA Y GOMA DE TARA

SILVIA PONCE ÁLVAREZ*

<http://orcid.org/0000-0003-1583-7113>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

JAVIER QUINO FAVERO

<http://orcid.org/0000-0003-0073-2925>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

JUAN RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

<http://orcid.org/0000-0002-9887-6419>

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú

MEDALIT CEVALLOS BARTUREN

<https://orcid.org/0000-0002-8616-4836>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

ABEL GUTARRA ESPINOZA

<http://orcid.org/0000-0002-4955-419X>

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

CAROLINA BELVER COLDEIRA

<https://orcid.org/0000-0003-2590-3225>

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Madrid, España

JORGE BEDIA MATAMOROS

<http://orcid.org/0000-0002-1605-7736>

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Madrid, España

Recibido: 31 de enero del 2025 / Aceptado: 11 de marzo del 2025

Publicado: 10 de junio del 2025

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2025.n48.7735>

Este estudio fue financiado por Innóvate Perú a través del proyecto PIAP-3-P521-14.

* Autor corresponsal

Correos electrónicos en orden de aparición: sponce@ulima.edu.pe; jquino@ulima.edu.pe; jrodriguez@uni.edu.pe; meda27ni@gmail.com; agutarra@ulima.edu.pe; carolina.belver@uam.es; Jorge.bedia@uam.es

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

RESUMEN. Uno de los contaminantes que se puede encontrar en los cuerpos de agua producto de la actividad industrial es el arsénico. Los métodos para la remoción de este no metal resultan ser poco eficientes y costosos; ante ello, se desarrolló un nuevo nanocompósito basado en goma de tara y nanopartículas de magnetita para la remoción de arsénico en agua. La caracterización de los nanocompósitos preparados con diferente relación (Fe_3O_4 : goma de tara) mostró la presencia de la fase magnetita, según los análisis por difracción de rayos X. El tamaño de partícula era de 13,74 nm, lo cual se determinó mediante microscopía electrónica de transmisión. Las pruebas de remoción de arsénico en agua realizadas con los nanocompósitos con diferente contenido de magnetita, variación de pH y peso de este mostraron que este material con 80 % en peso de magnetita presentaba mayor eficiencia. Los valores máximos estudiados sobre la concentración de arsénico fueron de 2 ppm, lo cual llegó a remover el 24,8 % en quince minutos de exposición con el nanocompósito con 80 % de nanopartículas de magnetita.

PALABRAS CLAVE: magnetita / goma de tara / arsénico / agua / metales pesados

STUDY OF ARSENIC ADSORPTION IN WATER USING NANOCOMPOSITE BASED ON MAGNETITE NANOPARTICLES AND TARA GUM

ABSTRACT. One of the pollutants that can be found in water bodies as a result of industrial activity is arsenic. Methods for the removal of this non-metal turn out to be inefficient and expensive. A new nanocomposite based on tara gum and magnetite nanoparticles was prepared for the removal of arsenic from water. The characterization of the nanocomposites prepared with different Fe_3O_4 : tara gum ratios showed the presence of the magnetite phase by XRD and it was also measurement the particle size (13.74 nm) by TEM. The arsenic removal tests in water carried out with the nanocomposites with different magnetite content, pH variation and nanocomposite weight showed that the nanocomposite with 80% by weight of magnetite presented higher efficiency. The maximum values studied for arsenic concentration were 2 ppm, reaching 24.8% removal in 15 minutes of exposure using the nanocomposite with 80% magnetite nanoparticles.

KEYWORDS: magnetite / tara gum / arsenic / water / heavy metals

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales más importantes para la vida humana. La contaminación ambiental, producto de las diversas actividades humanas, ha producido un efecto negativo sobre el agua disponible en el planeta para el consumo humano, lo cual se traduce en un decrecimiento sobre su cantidad a diario. Otro factor importante a tener en cuenta es el incremento de la población mundial y el crecimiento industrial, pero es el escaso manejo del agua a nivel industrial lo que produce el decrecimiento significativo de la disposición del agua (Do et al., 2025).

Uno de los contaminantes más peligrosos presente en los cuerpos de agua son los metales pesados, los cuales pueden causar efectos negativos sobre la salud humana (Qu et al., 2024; Shrestha et al., 2021). Dentro de estos, el arsénico es uno de los elementos más tóxicos y cancerígenos (National Research Council, 1999). Este se encuentra presente en el agua en tres formas inorgánicas —arsenolito (As_2O_3), óxido de arsénico (As_2O_5) y realgar (As_2O_2)—; sin embargo, generalmente está presente en dos estados de oxidación —arsenato (As V) y arsenito (As III)—. La presencia de alguno de estos estados depende del pH y el potencial redox. Por un lado, el arsenato es la forma estable en las especies inorgánicas y la más predominante en aguas. Por otro lado, el arsenito es la forma más común encontrada en aguas subterráneas anaerobias (Hechavarría-Hernández et al., 2023; Yan et al., 2024; Yu et., 2025).

La industria minera, por lo general, utiliza coagulantes inorgánicos en sus procesos para remover los sólidos suspendidos presentes en sus efluentes mediante el control del pH. Este proceso presenta varios inconvenientes, tales como gran cantidad de coagulante necesario, excesiva acumulación de lodos, inestabilidad y ruptura de agregados (Ahmad et al., 2020; Maity et al., 2021; Singh et al., 2021). Existen otros métodos alternativos para la remoción del arsénico, como la extracción de solvente por un electrodo químico, intercambio iónico, adsorción con carbón activado, precipitación y adsorción (Carneiro et al., 2025; Nikić et al., 2023). Dentro de todos los métodos mencionados, el de adsorción resulta ser el más sencillo, económico y eficiente para la remoción de metales pesados en efluentes (Singh et al., 2021; Yadav et al., 2021), por lo que este método ha captado una especial atención a nivel científico.

Otro componente muy importante para mejorar la remoción de los metales pesados en el agua es el uso de un floculante, el cual puede ser reemplazado por polímeros que podrían ser utilizados como matrices de adsorción para potenciar el tratamiento de las aguas. Dentro de estos polímeros, los biopolímeros han captado el interés de los científicos gracias a su no toxicidad, bajo costo y biodegradabilidad (Mandal et al., 2023; Thombare et al., 2016). La *Caesalpinia spinosa* o goma de tara (GT) es un biopolímero no iónico hidrofílico que tiene una cadena molecular larga con alto peso molecular y que, debido a la presencia de iones -OH en su superficie, permite

la formación de enlaces puente de hidrógeno con los metales pesados y la materia orgánica, así como su funcionalización (Valeriano-Mamani & Matos-Chamorro, 2019). Esta capacidad permite la adición de nanopartículas, como la magnetita, con el fin de mejorar sus propiedades adsorbentes. Además, su capacidad para solubilizarse en agua y biodegradarse fácilmente la hace una alternativa ideal para la remoción de metales pesados en agua (Saya et al., 2021). Las propiedades floculantes de la goma de tara son atribuidas a su elevada viscosidad para formar puentes entre las partículas suspendidas, lo cual se produce luego del proceso de adsorción de los contaminantes acuosos que origina la clarificación del agua (Choque-Quispe et al., 2018).

Los óxidos de hierro constituyen uno de los agentes más eficientes en la remoción de arsénico (Carneiro et al., 2022; Pintor et al., 2020). Las evidencias demuestran que los óxidos de hierro tienen una gran afinidad por la adsorción de los oxianiones de hierro (Aftabtalab et al., 2022; Hussain et al., 2019; Joshi et al., 2019). Las propiedades de superficie de los óxidos de hierro y la configuración espacial del arsénico permiten la adsorción de este último sobre los sitios de los óxidos de hierro que producen complejos de hierro (Ahmad et al., 2018; Gude et al., 2016). La eficiencia se ve incrementada en el proceso cuando los materiales se encuentran a escala nanométrica (Yu et al., 2022). Un punto importante que debe tenerse en cuenta cuando se remueve un contaminante es la separación del contaminante del material adsorbente, lo cual resulta difícil en la mayoría de los métodos de remoción de contaminantes. Debido a esto, luego de la remoción, se obtienen lodos que contienen el contaminante, por lo que es necesario gestionar estos residuos. Una de las ventajas de las nanopartículas de magnetita (MNP) es que son materiales superparamagnéticos que permiten su separación de una solución acuosa de manera sencilla a través de la aplicación de un pequeño campo magnético que permite la separación del agua, lo cual ha atraído interés a nivel de la comunidad científica.

En este estudio, se plantea la preparación del nanocompósito adsorbente, basado en MNP y GT, capaz de remover al arsénico del agua, y que permite reducir la cantidad de efluentes acuosos gracias a su biodegradabilidad, lo que beneficia a la reducción de los lodos en los procesos mineros. El estudio de la caracterización de este nanocompósito se realizó mediante DRX, FTIR, SBET, TEM, además de evaluarse la capacidad adsorbente del nanocompósito para la remoción de arsénico en agua.

METODOLOGÍA

Reactivos

La GT fue suministrada por Molinos Asociados S. A. C. (MASAC) de Perú; el cloruro de hierro III al 98 % y el cloruro de hierro II al 98 %, por la marca Aldrich; el hidróxido de

amonio y ácido clorhídrico, por la marca J. T. Baker; y el nitrógeno gaseoso al 99,999 %, por Linde Gas.

Preparación de la solución de goma de tara

La GT fue proporcionada por la empresa MASAC. Para la preparación de la solución, se pesaron 500 mg del compuesto y se disolvieron en 40 ml de agua desionizada en un vaso. La solución se mantuvo en agitación constante por tres horas a 500 r. p. m., tiempo necesario para la maduración de la goma.

Síntesis de los nanocompósitos MNP-GT

Para la obtención del nanocompósito de nanopartículas de magnetita y goma de tara (MNP-GT), se prepararon las siguientes soluciones: GT al 0,61 %, una solución acuosa de FeCl_3 ($0,30 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) y una solución de FeCl_2 ($0,30 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$). Estas dos últimas soluciones fueron mezcladas en una relación de peso adecuada para obtener diferentes relaciones de magnetita y de GT. Para ello, se prepararon nanocompósitos que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Proporciones de los reactivos utilizados para la preparación del nanocompósito

Nanocompósito	MNP (% W)	GT (% W)
MNP04-GT	4	96
MNP20-GT	20	80
MNP50-GT	50	50
MNP80-GT	80	20

Posteriormente, con un balón de tres bocas, se colocó una solución desoxigenada de NH_4OH 0,70 mol y luego se fue agregando la solución mezcla de hierro gota a gota. Con una agitación constante, se añadió la solución de GT y, posteriormente, se ajustó el pH a 10. La solución obtenida se agitó por 4,5 horas a 1200 r. p. m. Los nanocompósitos obtenidos fueron almacenados a 277 K debido a su biodegradabilidad.

Caracterización de los nanocompósitos preparados

La caracterización de los nanocompósitos MNP-GT se llevó a cabo mediante el uso de diferentes técnicas, como difracción de rayos X (DRX), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), determinación del área superficial BET and microscopía electrónica de transmisión (TEM). Los estudios de difracción de rayos X de las muestras se realizaron con una radiación Cu-K α . La evaluación estructural se realizó

mediante espectroscopía FTIR, mientras que los cambios morfológicos se estudiaron mediante TEM. La determinación del área superficial se realizó mediante isotermas BET (Brunauer-Emmett-Teller, SBET). Las propiedades magnéticas se evaluaron con el uso de un magnetómetro de muestra vibrante (*vibrating sample magnetometer*, VSM) de fabricación casera, operado a temperatura ambiente.

La determinación del nivel de adsorción de arsénico por parte del nanocompósito magnético se realizó mediante el uso de un reactor discontinuo (*batch reactor*), el cual contenía la solución acuosa contaminada artificialmente con arsénico. Esta solución fue preparada con arsenito de sodio (NaAsO_2 , Merck) disuelto en agua desionizada. Los experimentos de adsorción se llevaron a cabo a un pH de 7 en continua agitación por 30 minutos. Luego de transcurrido este tiempo, las muestras fueron medidas en el equipo PS Analytical Millennium Excalibur. Se trabajó en rangos que van desde los $0,07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ a $2,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ a pH 7 con el fin de poder estudiar la adsorción del arsénico en las muestras. La concentración máxima utilizada en los estudios de adsorción de arsénico fue de $2,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ debido a que este valor fue reportado como el máximo valor permisible en los efluentes mineros.

Ensayos de susceptibilidad enzimática del nanocompósito

Para estimar la susceptibilidad hacia la biodegradación, las muestras de GT y nanocompósito basado en GT fueron sometidas a la hidrólisis enzimática. La manosa liberada por la hidrólisis enzimática puede ser cuantificada a través de un ensayo acoplado con glucosa oxidasa (GOD), peroxidasa (POD) y o-dianisidina que actúa como cromógeno (Scaman et al., 1996). La manosa es oxidada por la GOD y el peróxido de hidrógeno liberado durante la reacción oxida la o-dianisidina en una segunda reacción catalizada por la POD. La o-dianisidina oxidada puede ser monitoreada espectrofotométricamente a 500 nm, así el aumento de la absorbancia es proporcional a la tasa de hidrólisis del sustrato.

La mananasa de *Aspergillus niger* (80 U/mL) y la β -manosidasa de *Cellulomonas fimi* (80 U/mL) fueron adquiridas de Megazyme Labs. La glucosa oxidasa de *Aspergillus niger* (128 200 U/g), la peroxidasa de rábano picante (179,2 purpurogallin U/mg) y la o-dianisidina (como dihidrocloruro) se obtuvieron de Sigma-Aldrich. La GT o el MNP-GT basado en goma de tara fueron utilizados como sustratos de la hidrólisis enzimática. La reacción se llevó a cabo en un volumen final de 755 μL de tampón acetato (pH 5,1), que contenía 128 unidades de glucosa oxidasa, 18 unidades de peroxidasa y 1,29 mmol de o-dianisidina. Tras equilibrar la mezcla a 37 °C, se inició la reacción mediante la adición de una mezcla con 2,4 unidades de β -manosidasa y 6 unidades de mananasa.

La reacción fue monitoreada a 500 nm con un espectrofotómetro UV/Vis Perkin-Elmer Lambda 40 con portacubetas termostatizado. La medición se registró

continuamente durante 180 minutos. Las pendientes (tasas de reacción) se calcularon con el *software* UV Kinlab de Perkin-Elmer, y las absorbancias se convirtieron en concentraciones molares mediante el coeficiente de extinción molar de la o-dianisidina oxidada: $4,83 \times 10^3 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ a 500 nm y 37 °C (Siotto et al., 2014).

Con el fin de estimar la susceptibilidad de la biodegradabilidad del MNP-GT, se realizaron pruebas de hidrólisis enzimática, en las que el nanocompósito actuó como sustrato. La reacción se llevó a cabo en 755 µL de tampón acetato (50 mM, pH 5,1) y contenía 128 unidades de glucosa oxidasa, 18 unidades de peroxidasa y 1,29 µmol de o-dianisidina. La reacción fue monitoreada con el espectrofotómetro UV/Vis Perkin-Elmer Lambda 40 a 500 nm durante 180 minutos, equipado con un portacubetas termostizado (Scaman et al., 1996; Siotto, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

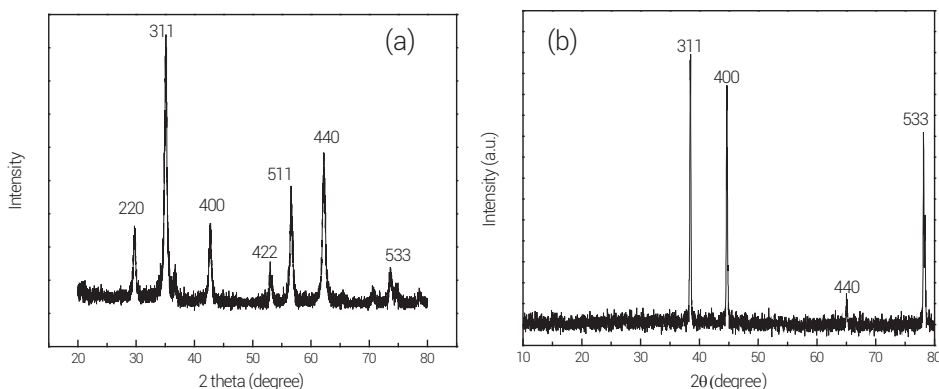
Se realizó la caracterización de todos los nanocompuestos preparados con las técnicas mencionadas anteriormente. Se observó la presencia de nanopartículas de magnetita en todos los casos, las cuales no se encontraban aglomeradas. Asimismo, no se evidenciaron estructuras diferentes a la presencia de magnetita en los materiales preparados. Posteriormente, se evaluó la capacidad para la remoción de arsénico en aguas artificialmente contaminadas y se determinó que el nanocompósito MNP80-GT presentaba mayor adsorción de arsénico. A continuación, se muestra la caracterización, estudios de adsorción y susceptibilidad enzimática de este nanocompósito (MNP80-GT).

Difracción de rayos X

El análisis por difracción de rayos X (DRX) del nanocompósito obtenido mostró la presencia de las nanopartículas de magnetita. La Figura 1b muestra el difractograma del nanocompósito MNP-GT, donde se puede apreciar la presencia de picos bien definidos en 38°, 44°, 65° y 78°, asociados a la fase magnetita para los planos 311, 400, 440 y 533 (JCPDS Card: N.º 79-0417) (Mendes et al., 2023). La comparación entre los patrones DRX del nanocompósito MNP80-GT (Figura 1b) y la magnetita sintetizada (Figura 1a) demostró un desplazamiento de los picos asociados a la presencia de magnetita, lo cual es debido al arreglo estructural que se produce para la formación de la cadena polimérica, la cual debe dar paso a la magnetita (Feuser et al., 2015; Mendes et al., 2023). Los picos que se observan en ambos difractogramas están bien definidos, lo cual se asocia a la cristalinidad de la magnetita y el MNP-GT, lo cual definiría la incorporación de las MNP en la estructura de la GT (Aguilera et al., 2019; Bhakat et al., 2018).

Figura 1

Comparación entre los patrones DRX



Nota. (a) Difractogramas de la magnetita sintetizada; (b) nanocompuesto MNP80-GT.

Espectroscopía FTIR

Los espectros FTIR (Figura 2) muestran bandas de adsorción entre 3700 a 3000 cm^{-1} y 1405 cm^{-1} , las cuales corresponden a las vibraciones O-H asociadas a los grupos hidroxilo presentes en la estructura responsable de la afinidad de la GT con las nanopartículas de magnetita. La banda ancha presente entre 3000 y 2700 cm^{-1} podría estar asociada al estrechamiento C-H (Gomez-Maldonado et al., 2022). Las bandas que se encuentran entre 1190 y 920 cm^{-1} podrían asignarse a la presencia de los enlaces C-O y C-O-H (Gomez-Maldonado et al., 2022; Prado et al., 2005), las cuales estarían presente debido al contenido de galactomananos en la goma de tara. Tal como se puede observar, el espectro de la muestra MNP80-GT (Figura 3b) se ha desplazado hacia números de onda inferiores debido a la adición de magnetita en la estructura de la GT. Además, se puede observar que la absorción de las bandas comprendidas entre 1190 y 920 cm^{-1} para el MNP80-GT se ha incrementado. Ello indica que la interacción entre los grupos hidroxilos del polímero y la magnetita es fuerte. El espectro de MNP80-GT muestra un incremento en la intensidad del pico ubicado a 1610 cm^{-1} , lo cual es asociado a la formación de enlaces puente de hidrógeno entre la GT y el MNP (Zhuang et al., 2020).

Figura 2

Espectros FTIR de los nanocompuestos

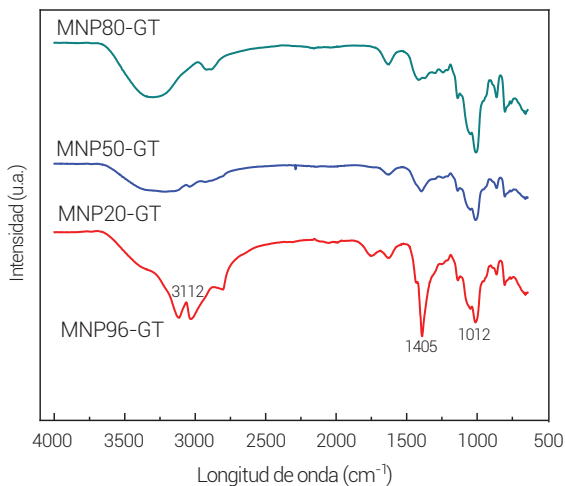
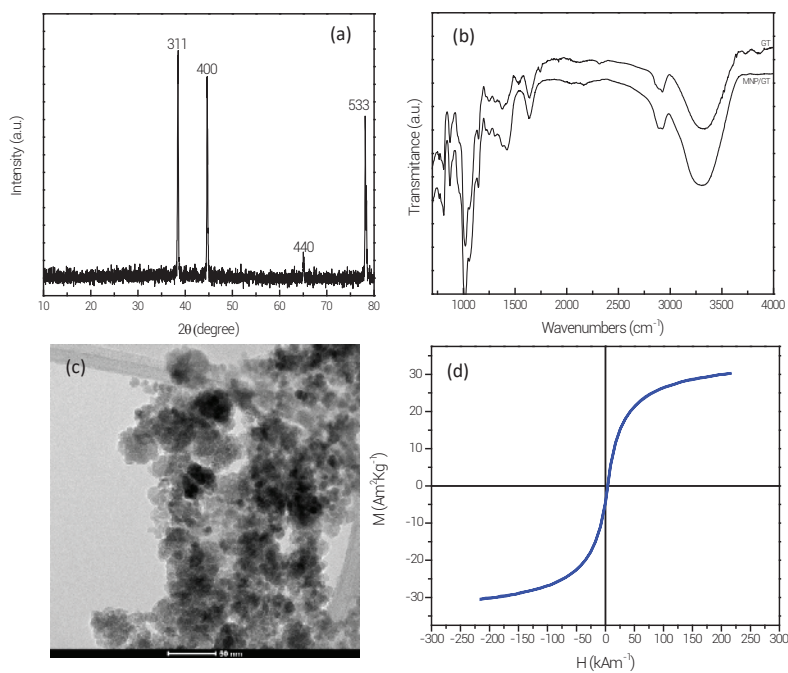


Figura 3

Estudio de la estructura del nanocompósito MNP80-GT



Nota. (a) Difractograma DRX; (b) espectros FTIR; (c) micrografía TEM; (d) curva de histéresis magnética del nanocompósito MNP80-GT entre -225 000 y 225 000 a 300 000.

Microscopía electrónica de transmisión

Las micrografías obtenidas mediante el microscopio electrónico de transmisión (MET) se muestran en la Figura 3c, donde se puede apreciar la presencia de las MNP en las incorporadas en la estructura de la GT. Tal como se puede observar, el método utilizado para la preparación no produjo aglomeración de las nanopartículas, lo cual es fundamental para las propiedades magnéticas del material, como una alta magnetización (Aguilera et al., 2019; Bhakat et al., 2018). Se puede observar que las nanopartículas son esféricas y bien definidas, lo cual muestra un diámetro aproximado de 13,16 nm. Estos datos fueron corroborados con los obtenidos mediante la técnica de *dynamic light scattering* (DLS).

Determinación de la superficie

Se determinó la superficie específica del MNP80-GT mediante el uso de la isoterma BET con nitrógeno a 77 K. Los datos obtenidos mostraron que la adsorción correspondía a una isoterma tipo II asociada a macroporos (Buttersack, 2022). El área total superficial del nanocompósito fue alrededor de $60,6629 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, la cual es considerada pequeña.

Estudio de las propiedades magnéticas

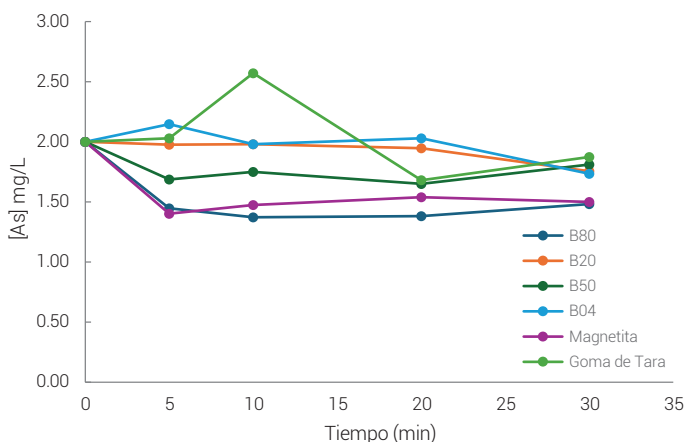
La Figura 3d muestra la curva de magnetización (M-H) a temperatura ambiente del MNP80-GT. La curva muestra una ausencia de la histéresis ($H_c = 0$), la cual se espera para materiales superparamagnéticos. La saturación por magnetización (M_s) se encuentra alrededor de $30 \text{ a } 35 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$, la cual se encuentra acorde al contenido de magnetita del nanocompósito. Una muestra con 100 % de magnetita podría mostrar una M_s alrededor de $40 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Kg}^{-1}$, lo cual se encuentra en correlación con otras investigaciones realizadas por otros autores (Sun et al., 2015; Tang et al., 2021; Tang et al., 2022).

Estudios de adsorción de arsénico

Con el fin de evaluar la capacidad de adsorción de arsénico en agua de los nanocompósitos, se llevaron a cabo pruebas de remoción del contaminante; para ello, se usó agua contaminada artificialmente con $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de arsénico. La Figura 4 muestra la evaluación de la capacidad adsorbente con el paso del tiempo, donde se pudo observar que el nanocompósito MNP80-GT era el que mostró una mayor capacidad de remoción, razón por la que se realizaron estudios sobre las variaciones del pH y la masa de adsorbente.

Figura 4

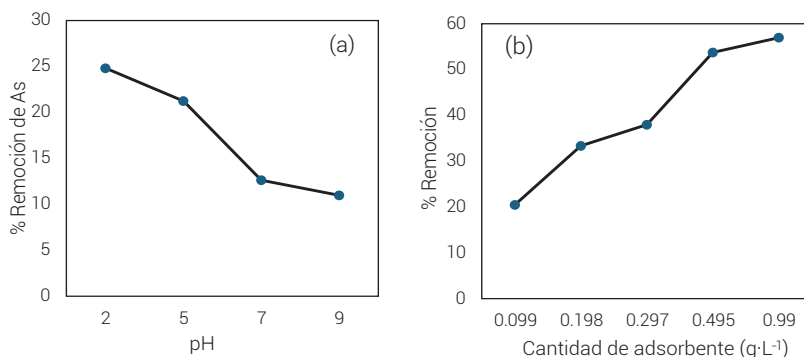
Adsorción de arsénico en agua con los diferentes nanocompuestos



Los estudios sobre la variación del pH de la solución contaminada artificialmente (Figura 5a) mostraron que la remoción se favorecía cuando se usó un pH ácido a temperatura ambiente (25 °C), pues se alcanzaba una remoción del 24,8 %. Este efecto se atribuye a que este medio incrementa la carga positiva sobre la superficie de las nanopartículas de magnetita, lo que promueve la atracción electrostática de las especies del arsénico. A un pH ácido, los grupos funcionales presentes en la magnetita (-OH) se protonan y se cargan positivamente para facilitar la interacción con los iones del arsénico como el arseniato (Chowdhury & Yanful, 2010). De acuerdo con los espectros FTIR obtenidos para el nanocompósito MNP-GT, se puede observar la presencia de grupos -OH, que facilitan esta interacción con los iones del arsénico.

Figura 5

Capacidad de remoción de arsénico



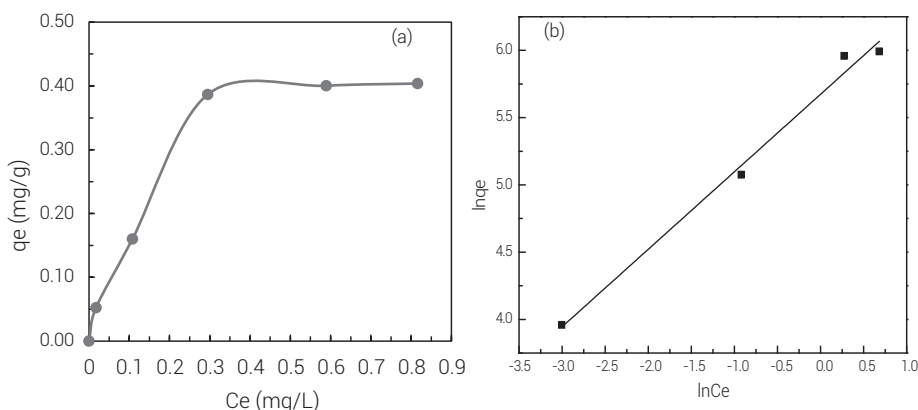
Nota. (a) En función de la variación del pH a una concentración de 0,10 g·L⁻¹ y (b) en función de la concentración del adsorbente (25 °C).

De la misma manera, se realizaron estudios sobre la concentración del nanocompósito MNP80-GT (Figura 5b) con el fin de determinar el efecto de la concentración del adsorbente. Se encontró que la capacidad de remoción se incrementaba con el aumento del adsorbente de forma lineal.

Los estudios de adsorción para el nanocompósito MNP80-GT se realizaron a 298 K y pH 7. Se mostró que la capacidad para la adsorción del arsénico se incrementaba con el aumento inicial del contaminante (Figura 6a), donde se obtuvo una capacidad de adsorción de 0,40 mg·g. Los datos sobre el equilibrio fueron ajustados a las ecuaciones de las isothermas de Lagmuir y Freundlich (Kalam et al., 2021) con coeficientes de 0,8795 y 0,9856, respectivamente, por lo que la isoterma a la cual se ajustaría mejor sería la de Freundlich.

Figura 6

Estudios de adsorción con MNP-GT



Nota. (a) Isotherma de adsorción del arsénico; (b) isoterma de Freundlich.

Pruebas de susceptibilidad enzimática del nanocompósito

La susceptibilidad enzimática, un tipo de prueba de selección, puede ser utilizada como una manera de simular la biodegradación *in situ* (Itävaara & Vikman, 1996), porque son necesarias para la ruptura de los polímeros naturales. Las enzimas extracelulares son utilizadas por los microorganismos para convertir los sacáridos poliméricos a productos solubles que son transportables dentro de las células (Warren, 1996). Los ensayos de degradación enzimática son utilizados cuando la estructura del polímero es conocida y las enzimas que degradan el polímero se encuentran disponibles (Itävaara & Vikman, 1996). La GT es un galactomanano que consiste de un esqueleto de 1,4- β -D-manosa y cadenas laterales de 1,6- α -D-galactosa, con una relación galactosa/manosa de 1 a 3 (Naoi, et al., 2002). Las enzimas hidrolíticas relacionadas a la hidrólisis de los mananos

y, en consecuencia, a la hidrólisis de la goma de tara son la mananasa, la β -manosidasa y la α -galactosidasa (Malgas et al., 2015). Nuestros ensayos tuvieron como objetivo degradar el esqueleto y monitorear la tasa de formación de la o-dianisidina oxidada, que es proporcional a la tasa de formación de manosa y, por ende, una medida de la susceptibilidad del polímero o nanocompósito basado en GT a la biodegradación. Las tasas fueron medidas con GT y con el MNP80-GT (Tabla 2).

Tabla 2

Tasas de degradación

Sustrato ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Concentración de las muestras ($\text{nmol}\cdot\text{min}^{-1}$)	
	GT	MNP80-GT
0,1625	0,07815735	0,07815735
0,3250	0,06252588	0,07815735
0,6500	0,03126294	0,04689441
1,3000	0,07815735	0,09378882

Como puede verse, en promedio, las diferencias en las tasas de degradación son pequeñas. Esto puede ser interpretado como que el sustrato (modificado o no) tiene la misma susceptibilidad al ataque enzimático, lo que significa que la modificación no alterará sustancialmente la degradación enzimática, es decir, la primera etapa de la biodegradación.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se incorporaron las nanopartículas de magnetita en la estructura de la GT mediante el método de coprecipitación con la aplicación de una preparación simple en atmósfera inerte. La incorporación de las nanopartículas de magnetita en la estructura de la GT no produjo una reducción significativa sobre la cantidad de grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) presentes en la estructura de la GT, los cuales favorecen la adsorción del arsénico en el agua.

Asimismo, los estudios superficiales del nanocompósito MNP-GT no mostraron una aglomeración de las nanopartículas de magnetita a pesar de su tamaño (13 nm). Las propiedades del nanocompósito MNP80-GT mostraron una gran eficiencia en la remoción de iones arsénico en el agua a pesar de presentar una superficie específica reducida (SBET : $60 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$). De acuerdo con la evaluación de las propiedades magnéticas del MNP80-GT, se determinó que el material era superparamagnético. Asimismo, la evaluación sobre la degradabilidad enzimática del nanocompósito MNP80-GT demostró que la presencia de las nanopartículas de magnetita en la goma de tara no influenciaba en su capacidad para degradarse. Por ello, el nanocompósito MNP80-GT

es una alternativa ecoamigable a los floculantes que se utilizan actualmente para la remoción de arsénico.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Silvia Patricia Ponce Álvarez: conceptualización, *data curation*, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, supervisión, validación, visualización, escritura-borrador original, redacción (revisión y edición). **Javier Martín Quino Favero:** conceptualización, *data curation*, investigación, metodología, supervisión, validación, visualización, escritura-borrador original, redacción (revisión y edición). **Juan Martín Rodríguez Rodríguez:** conceptualización, *data curation*, investigación, metodología, recursos, supervisión, validación, visualización, escritura-borrador original, redacción (revisión y edición). **Medalit Cevallos Barturen:** *data curation*, análisis formal, investigación, validación, visualización, redacción (revisión y edición). **Abel Gutarra Espinoza:** *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, validación, visualización, escritura-borrador original, redacción (revisión y edición). **Carolina Belver Coldeira:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, validación, visualización, escritura-borrador original, redacción (revisión y edición). **Jorge Bedia Matamoros:** conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, validación, visualización, escritura-borrador original, redacción (revisión y edición).

REFERENCIAS

- Aftabtalab, A., Rinklebe, J., Shaheen, S., Khan Niazi, N., Moreno-Jiménez, E., Schaller, J., & Knorr, K.-H. (2022). Review on the interactions of arsenic, iron (oxy)(hydr) oxides, and dissolved organic matter in soils, sediments, and groundwater in a ternary system. *Chemosphere*, 286(2), 131790 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131790>
- Aguilera, G., Berry, C., West, R., Gonzalez-Monterrubio, E., Angulo-Molina, A., Arias-Carrión, O., & Méndez-Rojas, M. A. (2019). Carboxymethyl cellulose coated magnetic nanoparticles transport across a human lung microvascular endothelial cell model of the blood-brain barrier. *Nanoscale Advances*, 1, 671-685. <https://doi.org/10.1039/C8NA00010G>

- Ahmad, A., Cornelissen, E., van de Wetering, S., van Dijk, T., van Genuchten, C., Bundschuh, J., van der Wal, A., & Bhattacharya, P. (2018). Arsenite removal in groundwater treatment plants by sequential permanganate-ferric treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 221-229. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.10.014>
- Ahmad, A., van der Wens, P., Baken, K., de Waal, L., Bhattacharya, P., & Stuyfzand, P. (2020). Arsenic reduction to <1µg/L in Dutch drinking water. *Environmental International*, 134(105253). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105253>
- Bhakat, D., Barik, P., & Bhattacharjee, A. (2018). Electrical conductivity behavior of Gum Arabic biopolymer-Fe₃O₄ nanocomposites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 112, 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2017.09.002>
- Buttersack, C. (2022). Modeling of type II high-resolution sorption isotherms: Evaluation of different approaches. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 650, 129489. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129489>
- Carneiro, M., Coelho, J., Pintor, A., Boaventura, R., Botelho, C. (2022). Multi-cycle regeneration of arsenic-loaded iron-coated cork granulates for water treatment, *Journal of Water Process Engineering*, 50, 103291. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103291>
- Carneiro, M., Tomasi, I., Boaventura, R., Botelho, C., & Pintor, A. (2025). Environmental impact and cost analysis of arsenic removal from water using iron-based adsorbents: Comparison between natural and commercial materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 115044. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115044>
- Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A. M., & Ramos-Pacheco, B. S. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. *Tecnología Química*, 38(2), 298-309. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200008&lng=es&tlng=es
- Chowdhury, S. R., & Yanful, E. K. (2010). Arsenic removal from aqueous solutions by adsorption on magnetite nanoparticles. *Water and Environment Journal*, 25(3), 429-437. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00242.x>
- Do, D., Le, A., Vu, V., Le, D., & Bui, H. (2025). Evaluation of water quality and key factors influencing water quality in intensive shrimp farming systems using principal component analysis-fuzzy approach. *Desalination and Water Treatment*, 321, 101002. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101002>
- Feuser, P., dos Santos, L., dos Santos, M., da Cas, A., Castilho, A., Ricci-Junior, E., Nele, M., Tedesco, A., Sayer, C., & Hermes, P. (2015). Encapsulation of magnetic nanoparticles in poly(methyl methacrylate) by miniemulsion and evaluation of

- hyperthermia in U87MG cells. *European Polymer Journal*, 68, 355-365. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.029>
- Gomez-Maldonado, D., Ponce, S., & Peresin, M. S. (2022). The applicability of cellulose – Tara Gum composite hydrogels as dye capture adsorbents. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233(8), Artículo 340. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05818-z>
- Gude, J. C. J., Rietveld, L.C., & van Halem, D. (2016). Fate of low arsenic concentrations during full-scale aeration and rapid filtration. *Water Research*, 88, 566-574. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.034>
- Hechavarría-Hernández, A., Martins, J., Barbiero, L., Rezende-Filho, A., Montes, C., Melfi, A., & Fostier, A. (2023). Spatial and seasonal variation of arsenic speciation in Pantanal soda lakes. *Chemosphere*, 329, 138672. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138672>
- Hussain, M., Bibi, I., Shahid, M., Shaheen, S., Shakoor, M., Bashir, S., Younas, F., Rinklebe, J., & Niazi, N. (2019). Chapter Two. Biogeochemical cycling, speciation and transformation pathways of arsenic in aquatic environments with the emphasis on algae. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 85, 15-51. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2019.03.007>
- Itävaara, M., & Vikman, M. (1996). An overview of methods for biodegradability testing of biopolymers and packaging materials. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, 4, 29-36. <https://doi.org/10.1007/BF02083880>
- Joshi, S., Sharma, M., Kumari, A., Shrestha, S., & Shrestha, B. (2019). Arsenic removal from water by adsorption onto iron oxide/nano-porous carbon magnetic composite. *Applied Science*, 9(18), 3732. <https://doi.org/10.3390/app9183732>
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S., Kamal, M., & Patil, S. (2021). Surfactant adsorption isotherms: A review. *ACS Omega*, 6(48), 32342-32348. <http://doi.org/10.1021/acsomega.1c04661>
- Maity, J., Chen, C.-Y., Bhattacharya, P., Sharma, R., Ahmad, A., Patnaik, S., & Bundschuh, J. (2021). Advanced application of nano-technological and biological processes as well as mitigation options for arsenic removal. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 123885. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123885>
- Malgas, S., van Dyk, J. S., & Pletschke, B. I. (2015). A review of the enzymatic hydrolysis of mannans and synergistic interactions between β -mannanase, β -mannosidase and α -galactosidase. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(8), 1167-1175. <http://doi.org/10.1007/s11274-015-1878-2>
- Mandal, S., Hwang, S., & Shi, S. Q. (2023). Guar gum, a low-cost sustainable biopolymer, for wastewater treatment: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 226, 368-382. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.039>

- Mendes, J., Feuser, P., Cercená, R., Peterson, M., & Gonçalves, A. (2023). Obtention of magnetite nanoparticles via the hydrothermal method and effect of synthesis parameters. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 580, 170925. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170925>
- Naoi, S., Hatakeyama, T., & Hatakeyama, H. (2002). Phase transition of locust bean gum-, tara gum- and guar gum-water systems. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 70, 841-852. <https://doi.org/10.1023/A:1022260304686>
- National Research Council. (1999). *Arsenic in drinking water*. National Academy Press. <https://doi.org/10.17226/6444>
- Nikić, J., Watson, M., Tenodi, K., Dalmacija, B., & Agbaba, J. (2023). Pilot study on arsenic removal from phosphate rich groundwater by in-line coagulation and adsorption. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100280. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100280>
- Pintor, A., Vieira, B., Brandão, C., Boaventura, R., & Botelho, C. (2020). Complexation mechanisms in arsenic and phosphorus adsorption onto iron-coated cork granulates. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104184. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104184>
- Prado, B., Kim, S., Özen, B., & Mauer, L. (2005). Differentiation of carbohydrate gums and mixtures using fourier transform infrared spectroscopy and chemometrics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(8), 2823-2829. <https://doi.org/10.1021/jf0485537>
- Qu, M., Xiong, J., Zhou, J., Wang, L., Hu, T., Liu, F., & Zhang, Q. (2024). Modified water treatment residual serves as an adsorbent for the removal of heavy metals from water: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 146, 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.11.048>
- Saya, L., Malik, V., Singh, A., Singh, G., Gambhir, G., Singh, W., Chandra, R., & Hooda, S. (2021). Guar gum based nanocomposites: role in water purification through efficient removal of dyes and metal ions. *Carbohydrate Polymers*, 261, 117851. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117851>
- Scaman, C. H., Lipari, F., & Herscovics, A. (1996). A spectrophotometric assay for α -mannosidase activity. *Glycobiology*, 6(3), 265-70. <http://doi.org/10.1093/glycob/6.3.265>
- Shrestha, R., Ban, S., Devkota, S., Sharma, S., Joshi, R., Tiwari, A., Kim, H., & Joshi, K. (2021). Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105688. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105688>

- Singh, P., Borthakur, A., Singh, R., Bhadouria, R., Singh, V., & Devi, P. (2021). A critical review on the research trends and emerging technologies for arsenic decontamination from water. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100607. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100607>
- Siotto, M., Pasqualetti, P., Marano, M., & Squitti, R. (2014). Automation of o-dianisidine assay for ceruloplasmin activity analyses: Usefulness of investigation in Wilson's disease and in hepatic encephalopathy. *Journal of Neural Transmission*, 121(10), 1281-1286. <https://doi.org/10.1007/s00702-014-1196-0>
- Sun, Y., Han, Y., Gao, P., Wei, X., & Li, G. (2015). Thermogravimetric study of coal-based reduction of oolitic iron ore: Kinetics and mechanisms. *International Journal of Mineral Processing*, 143, 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.09.005>
- Tang, Z., Liu, X., Gao, P., Han, Y., & Xu, B. (2022). Effective induction of magnetite on suspension magnetization roasting of hematite and reaction kinetics verification. *Advanced Powder Technology*, 33(6), 103593. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2022.103593>
- Tang, Z., Zhang, Q., Sun, Y., Gao, P., & Han, Y. (2021). Pilot-scale extraction of iron from flotation tailings via suspension magnetization roasting in a mixture of CO and H₂ followed by magnetic separation. *Resources, Conservation and Recycling*, 172, 105680. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105680>
- Thombare, N., Jha, U., Mishra, S., & Siddiqui, M. Z. (2016). Guar gum as a promising starting material for diverse applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 361-372. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.001>
- Valeriano-Mamani, J., & Matos-Chamorro, R. (2019). Influence of tara (*Caesalpinia spinosa*) gum as an aid in the coagulation-flocculation process to remove the turbidity of an artificial suspension of bentonite. *Información Tecnológica*, 30(5), 299-308. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000500299>
- Warren, R. A. J. (1996). Microbial hydrolysis of polysaccharides. *Annual Review of Microbiology*, 50(1), 183-212. <http://doi.org/10.1146/annurev.micro.50.1.183>
- Yadav, M., Singh, G., & Jadeja, R. (2021). Physical and chemical methods for heavy metal removal. *Pollutants and Water Management: Resources, Strategies and Scarcity*, 15, 377-397. <https://doi.org/10.1002/9781119693635.ch15>
- Yan, W., He, X., Chen, M., Qian, B., Li, M., Yan, Y., Lin, C., & Mao, Z. (2024). High arsenic pollution of the eutrophic Lake Taihu and its relationship with iron, manganese, and dissolved organic matter: High-resolution synchronous analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 467, 133644. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133644>

- Yu, X., Yang, R., Wu, C., Liu, B., & Zhang, W. (2022). The heating efficiency of magnetic nanoparticles under an alternating magnetic field. *Scientific Reports*, 12, 16055. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20558-0>
- Yu, Z., Wei, C., Yang, F., Li, Z., Jiang, B., Dai, W., Tang, C., & Zhang, Y. (2025). Colloids fractionation and characterization of arsenic (As) and dissolved organic matter (DOM) in surface water around a closed arsenic mine. *Journal of Hazardous Materials*, 487, 137094. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137094>
- Zhuang, J., Li, M., Pu, Y., Ragauskas, A. J., & Yoo, C. G. (2020). Observation of potential contaminants in processed biomass using fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Sciences*, 10(12), 4345. <https://doi.org/10.3390/app10124345>