

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Aplicación de nanopartículas de magnetita y cáscara de Cacao
en aguas de relaves mineros auríferos en zonas del altiplano
peruano**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autores:

Rosbelia Quispe Cotaluque
Yoselin Gleni Limahuaya Chipana

Asesor:

Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla

Juliaca, febrero de 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: “**Aplicación de nanopartículas de magnetita y cáscara de Cacao en aguas de relaves mineros auríferos en zonas del altiplano peruano**” de los autores **Rosbelia Quispe Cotaluque** y **Yoselin Gleni Limahuaya Chipana** tiene un índice de similitud de 18% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 21 días del mes de mayo del año 2026.



Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 06 día(s) del mes de febrero del año 20... las 9:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección de la presidente(a):



Msc. Miguel Angel Salcedo Enriquez el (la) secretario(a): Dr. Mateo Alzamora Salinas Mora y los demás miembros: Msc. Juan Eduardo Vigo Rivera, Msc. Rose Adelina Gallata Churo y el (la) asesor(a) Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: "Aplicación de nanopartículas de magnetita y cáscara de cacao en aguas de ríos de mineros auríferos en zonas del altiplano peruano"

del(los) bachiller/es: a) Rosbelia Quipe Gotaluque b) Yoselin Gleni Limahuaya Chipana c)

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Ambiental (Especialización del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Rosbelia Quipe Gotaluque

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

Bachiller (b): Yoselin Gleni Limahuaya Chipana

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Prendado/a
Asesor/a
Bachiller (a)

Miembro
Bachiller (b)

Secretario/a
Miembro
Bachiller (c)

INDICE

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	8
Materiales y metodologías.....	13
Ubicación del lugar de estudio y Muestreo inicial del agua.....	13
Síntesis de la magnetita Fe ₃ O ₄	14
Preparación del adsorbente a base de la cascara de cacao.....	15
Preparación de las mezclas y condiciones experimentales.....	16
Procedimiento Experimental.....	17
Diseño y Análisis Estadístico.....	18
Resultados.....	19
Caracterización de nanopartículas de magnetita.....	19
Caracterización de Cáscara de Cacao.....	22
Caracterización inicial del agua de relave minero.....	23
Evaluación experimental después del tratamiento.....	24
Análisis estadístico de las variables evaluadas.....	28
Discusión.....	29
Caracterización de Nanopartículas de Magnetita.....	29
Caracterización de cáscara de cacao.....	30
Caracterización inicial del agua de relave minero.....	32
Evaluación experimental después del tratamiento.....	33
Análisis estadístico de las variables evaluadas.....	38
Conclusiones.....	39
Referencias.....	40
Anexos.....	46

Aplicación de nanopartículas de magnetita y cáscara de Cacao en aguas de relaves mineros auríferos en zonas del altiplano peruano

Application of magnetite nanoparticles and cocoa husk in auriferous mine tailings water zone of the peruvian altiplano

Resumen

La actividad minera en La Rinconada (Perú) genera aguas de relave con elevadas concentraciones de metales pesados, lo que constituye un alto riesgo ambiental. En esta investigación se determinó la capacidad de las nanopartículas de magnetita y de la cáscara de cacao, aplicadas individualmente y en combinación, para reducir la concentración de metales pesados a través de mecanismos de coagulación–floculación, adsorción y separación magnética. Los materiales fueron caracterizados por DRX, SEM-EDS y FTIR. Posteriormente, se ejecutaron ensayos de Test de Jarras aplicando dosis de 1, 2 y 4 g/L en cinco proporciones de mezcla. El efluente inicial se caracterizó por un pH de 12.88, turbidez de 391 UNT, conductividad eléctrica de 6.5 ms/cm y presentando altas concentraciones de metales pesados; As (0.545 mg/L), Cu (1.107 mg/L), Fe (5.740 mg/L) y Hg (0.298 mg/L). Los resultados demostraron que, para la turbidez, la dosis de 1 g/L con proporción 50:50 (magnetita: cáscara de cacao) disminuyó a 4.32 UNT (98.9%). Respecto a los metales pesados: magnetita pura (4 g/L) para el As, 0.041 mg/L (92.48%); 1 g/L de cáscara de cacao pura para el Cu, 0.030 mg/L (97.29%); la proporción 75:25 (1 g/L) para el Fe, 0.265 mg/L (95.39%); y para el Hg, <0.0004 mg/L. Se concluye que el uso de nanopartículas de

magnetita, cáscara de cacao de manera individuales y sus combinaciones representa una tecnología efectiva y factible para el tratamiento de aguas de relave en zonas mineras altoandinas.

Palabras clave: Aguas de relave; cáscara de cacao; metales pesados; nanopartículas de magnetita; remoción.

Abstract

Mining operations in La Rinconada, Peru, produce tailings wastewater containing elevated levels of heavy metals, posing a serious environmental challenge. This research investigated the performance of magnetite nanoparticles and cocoa pod husk, used separately and in different combinations, for the reduction of heavy metals through coagulation – flocculation, adsorption, and magnetic separation processes. The adsorbent materials were characterized using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDS), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). Jar test experiments were subsequently carried out using dosages of 1, 2, and 4 g/L and five mixing ratios. The untreated effluent exhibited a pH of 12.88, turbidity of 391 NTU, electrical conductivity of 6.5 mS/cm, and elevated concentrations of arsenic (0.545 mg/L), copper (1.107 mg/L), iron (5.740 mg/L), and mercury (0.298 mg/L). Among the evaluated conditions, the mixture containing equal proportions of magnetite and cocoa pod husk at a dosage of 1 g/L achieved the greatest turbidity reduction, reaching 4.32 NTU, equivalent to 98.9%. For metal removal, pure magnetite at 4 g/L provided the highest arsenic reduction, lowering its concentration to 0.041 mg/L (92.48%). In the case of

copper, the best result was obtained with pure cocoa pod husk at 1 g/L, yielding a final concentration of 0.030 mg/L (97.29%). Iron removal was most effective with the 75:25 mixture at 1 g/L, reducing the concentration to 0.265 mg/L (95.39%), whereas mercury levels decreased to below the analytical detection limit (<0.0004 mg/L). These findings suggest that magnetite nanoparticles, cocoa pod husk, and their combined application constitute a promising and practical alternative for the treatment of mining tailings wastewater in high-altitude mining environments.

Keywords: Cocoa husk; heavy metals; magnetite nanoparticles; removal; tailing wate

Introducción

La minería aurífera, sobre todo la pequeña minería e informal ha experimentado cambios muy acelerados en las últimas décadas y así implica un componente económico relevante en el Perú; sin embargo, su crecimiento muy elevado ha generado impactos ambientales y sociales muy graves (Osinergmin, 2016). En las regiones como Puno, Madre de Dios, La Libertad el sector conocido como Sur Medio se concentran los focos más críticos de la actividad informal de la minería, donde la ausencia de control de las autoridades y la expansión desordenada de todas las operaciones que se realizan han provocado la contaminación de ríos y lagunas con los metales pesados, superando así los estándares de calidad ambiental y causando conflictos socioambientales (Attiogbe y Nkansah, 2017; Loza y Ccancapa, 2020).

En el departamento de Puno, especialmente en los centros mineros la Rinconada y Lunar de oro (Ananea), el problema de contaminación ambiental está cada vez peor que se genera y se intensifica es debido al desarrollo de las operaciones artesanales que carecen de sistemas de tratamiento de dentro de los efluentes. A esto se le suma el incremento del precio del oro entre los años de 2009 y 2010 que impulsó la instalación masiva de plantas de beneficio conocidos como (trapiches, molinos y quimbaletes); los cuales liberan sus aguas ácidas con elevadas concentraciones de metales pesados Loza y Ccancapa (2020). A eso se suma la costumbre de la amalgamación con mercurio, que genera gran cantidad de emisiones atmosféricas y favorece la formación de metilmercurio, un compuesto altamente tóxico y bioacumulable que ingresa a la cadena trófica esto según (Chen et al., 2022; Rosales et al., 2013). El mercurio suele aplicarse como agente principal de indicador de

contaminación, así mismo los efluentes mineros presentan mezclas complejas de otros metales tóxicos, como arsénico, plomo, cobre, zinc, antimonio y talio, cuyos efectos se potencian entre sí, así mismo se incrementan la toxicidad del medio ambiente (Liu, You y Chung 2011; Londoño Franco, Londoño Muñoz y Muñoz 2016). Estos estos contaminantes se van acumulando poco a poco en los sedimentos y en los organismos acuáticos, dañando la biodiversidad y generando riesgo para las comunidades cercanas que dependen de esas aguas que se usan para irrigar sus tierras de cultivo y alimentar al ganado. Por eso, hoy en día se ve urgente implementar tecnologías de tratamiento que realmente funcionen y ayuden a reducir la contaminación en estas zonas mineras (Loza y Ccancapa, 2020; Saldaña et al., 2022 y Salazar et al., 2021).

El tratamiento de estos efluentes contaminados por los metales tóxicos, especialmente mercurio, arsénico, cobre y plomo, necesita métodos que sean eficientes, accesibles y que realmente puedan aplicarse en zonas mineras donde muchas veces los recursos son muy limitados (Pabón, 2020). En este sentido, la coagulación–floculación sigue siendo una de las técnicas más aplicadas porque nos ayuda a juntar todas las partículas contaminantes para formar flóculos y así facilitar su sedimentación mediante el uso de coagulantes y auxiliares adecuados.

Sin embargo, a pesar de que este proceso da buenos resultados, también presenta varias limitaciones en la parte que sería operativa, como el alto consumo de productos químicos, la generación de estos lodos y los costos de tratamiento. Por eso, en los últimos años se ha empezado a buscar alternativas complementarias y más sostenibles que permitan incrementar la eficacia del tratamiento y disminuir el impacto ambiental de estos procesos (Guzmán, Tejada y Garcia 2013; Guillén et al., 2020).

En medio de toda esta problemática, la nanotecnología ha comenzado a verse en calidad de opción bastante favorable y con gran potencial para la depuración de aguas contaminadas que hay en el lugar. Entre los materiales

que más destacan es la nanopartícula de magnetita (Fe_3O_4), ya que poseen propiedades fisicoquímicas muy particulares que las hacen eficientes para poder así remover los contaminantes. Su gran área superficial permite que tengan mayor contacto e interacción con los metales tóxicos presentes en los efluentes, mejorando así el proceso de remoción.

Además, que una de las ventajas de las nanopartículas es su comportamiento superparamagnético, por qué después del tratamiento pueden separarse rápidamente del agua utilizando campos magnéticos externos de fácil manejo. Ya que esto facilita bastante el proceso de separación sólido a líquido y así evitar la producción excesiva de lodos secundarios, que es algo habitual que normalmente ocurre en los tratamientos químicos tradicionales o convencionales y que acaba generando y creando más residuos o como otros lo conocen como desechos contaminantes (Falciglia et al., 2022; Garcia y Gonzalez, 2021; Rajput et al., 2016).

Simultáneamente, la búsqueda de procesos ecológicos o también eco amigables y menos contaminantes ha promovido el uso y empleo de coagulantes naturales como una opción de alternativa frente a los productos químicos sintéticos que son frecuentemente utilizados en los tratamientos de agua (Marimon, 2018). Entre estos materiales, la cáscara de cacao ha sido objeto y recibido crecientemente una atención por su carácter y naturaleza lignocelulósica. Su composición, que contiene una gran cantidad y rica en celulosa, pectina y lignina, le da una densidad de malla de red de grupos funcionales activos, por ejemplo, los hidroxilos y carboxilos que le proporcionan y otorgan una alta habilidad o capacidad de adsorción de iones metálicos en medio acuoso (Aderonke et al., 2014; Lara, Villabona y Arrieta 2017). Asimismo, el uso y aprovechamiento de este material no solo ayuda o contribuye a la depuración en el tratamiento de aguas, sino que también le da valor y le otorga un valor a un residuo agroindustrial que frecuentemente acaba muchas veces en desechado. En otras palabras, la cascara de cacao se

reutiliza, fomentando y a la vez promoviendo la economía circular y ofreciendo como también brindando una alternativa más asequible y sustentable para las áreas de las regiones donde los recursos económicos suelen ser escasos y limitados (Cedeño y Vásquez, 2024; Soto Llanco, 2019).

En estas circunstancias, la propuesta actual tiene como objetivo optimizar y buscar para poder aprovechar las funciones específicas de ambos para mejorar el tratamiento de los efluentes mineros utilizando las funciones particulares de estos dos materiales. Por un lado, la cascara de cacao captura los iones metálicos a través de una reacción química debido a la existencia de grupos funcionales contenidos en su matriz compuesta por celulosa, pectina y lignina, lo que le permite retener con eficiencia los contaminantes de manera eficiente (Aderonke et al., 2014). Por otra parte, debido a su amplia superficie las nanopartículas de magnetita también participan interviniendo de manera activa en la adsorción, lo que permite una interacción más intensa con los contaminantes detectados en efluentes (Rajput et al., 2016) además, actúan como un agente densificador, porque al añadir más peso al floculo esto hace que este sedimento con mayor rapidez y pueda separarse fácilmente y sin complicaciones mediante el uso de un campo magnético.

Dicho de otra manera, esta mezcla trabaja u opera en pareja, mientras la cascara de cacao contribuye a atrapar o capturar los metales pesados, la magnetita facilita y a su vez permite que el tratamiento realice una separación más rápida y practica del tratamiento. Así se pretende conseguir un procedimiento más rápido, simple y operativo para depurar agua contaminada con una eficiencia de remoción alta.

Según investigaciones recientes nos indican y a la vez se observan que la combinación de magnetita con cascara de cacao tienen un potencial significativo para eliminar metales pesados, algunos estudios reportan y indican que el uso de coagulantes tienen eficiencias de remoción entre el 68% y 88% utilizando coagulantes derivados de cascara de cacao mientras que

otras investigaciones alcanzaron hasta un 84.24% de eficiencia al trabajar con mezclas de magnetita y cascara de cacao en condiciones controladas de laboratorio (Coello et al., 2024; Naranjo, 2023; Verdezoto, 2023). Estos hallazgos que esta combinación o combinación tiene un alto potencial para ser utilizada y a su vez poder ser aplicada durante el proceso de tratamiento de aguas que contienen metales pesados en condiciones reales, sobre todo en zonas mineras donde el impacto ambiental es una problemática bien fuerte, complicado de controlar y poderlo manejar.

A pesar de que la magnetita (Fe_3O_4) y otros adsorbentes naturales han demostrado buenos resultados positivos en la remoción y así eliminar los metales pesados, todavía existe poca información acerca de como funcionan cuando se aplican conjuntamente en aguas reales provenientes de los relaves mineros. La mayoría de estudios e investigaciones se han desarrollado y llevado en el laboratorio bajo condiciones controladas, así que todavía queda pendiente verificar que tan eficaces pueden ser en las situaciones reales donde la contaminación suele ser mucho más compleja y a su vez más complicada.

Por consiguiente, la presente investigación busca evaluar la eficiencia de nanopartículas de magnetita y la cascara de cacao, por separado o combinados, para remover metales pesados y disminuir la turbidez presente en aguas reales de relaves auríferos del altiplano peruano. Para ello se realizan ensayos de test de jarras y análisis fisicoquímicos, buscando identificar que tratamiento ofrece mejores resultados y puede ser considerado en una alternativa más eficaz y ambientalmente viable para este tipo de contaminación minera.

Materiales y metodologías

Ubicación del lugar de estudio y Muestreo inicial del agua

La fase de campo para su evaluación se realizó en el sector o área de Antahuila (Centro Poblado La Rinconada, Puno), a una altura de 5120 m.s.n.m. La ubicación del lugar de muestreo se georreferenció en coordenadas geográficas UTM (WGS-84, Zona 19L): 452240 E, 8383035 N.

Las muestras se recolectaron directamente del vertido final de la planta de beneficio, empleando los envases de polietileno de alta densidad que tienen un volumen de 250 mililitros, que habían sido previamente purgados para incrementar su eficiencia. Para la cuantificación de metales totales, la preservación de muestras se realizó mediante acidificación in situ con ácido nítrico (HNO_3) en proporción de una relación de 1:1 se utilizó hasta lograr un pH inferior o debajo a 2, conforme a los procedimientos estándar de preservación de la APHA para poder cuantificar metales totales. Las alícuotas fueron refrigeradas a 4 °C sin la incorporación de aditivos para medir el pH y la turbidez. Hasta el laboratorio acreditado, el transporte se realizó bajo estricta cadena de custodia hasta su destino final en este caso fue el laboratorio. La caracterización inicial se fundamentó en métodos estandarizados: el método fue el de electrométrico para pH (SMEWW-APHA 4500-H+B), nefelométrico para turbidez (SMEWW-APHA 2130 B) y Espectrometría de Emisión Óptica (ICP-OES) empleando el método EPA 200.7 para metales totales.

Síntesis de la magnetita Fe_3O_4

Se realizó por la metodología de coprecipitación química modificada y adaptado que fue descrita por Marimon (2018) y Tapia y Huanca (2019) fue la utilizada. Se elaboraron soluciones acuosas de hierro ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a 1.5M y ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) a 0.75M con una proporción molar de 2:1. Siendo la concentración de la primera que se calentó a 75–80 °C bajo burbujeo continuo mientras se inyecta nitrógeno (N_2) de forma constante para mantener una atmósfera inerte. Durante todo el proceso de elaboración el N_2 se inyectó a flujo constante durante toda la coprecipitación, regulado y controlado manualmente mediante un regulador de presión. Posteriormente, se añadió solución de hidróxido de sodio (NaOH) gota a gota, agitando mecánicamente constante a 500 rpm, hasta que se realizó la constitución de un precipitado negro que es característico y típico de la magnetita. El sistema se mantuvo en reacción durante 60 minutos para favorecer la cristalización. El precipitado fue separado usando un campo magnético externo (imán de neodimio con dimensiones de 25 mm × 5 mm), luego, se limpió con agua destilada hasta alcanzar un valor de pH neutro y se secó en un horno a 60 °C durante 12 horas. Finalmente, la muestra fue triturada y tamizada utilizando un tamiz N° 200 (75 μm), eligiendo la fracción pasante para garantizar una uniformidad granulométrica homogénea. Se verificó la fase cristalina mediante el análisis de (DRX). Asimismo, la morfología y composición elemental fueron evaluadas empleando (EDS-SEM). Todos los análisis se realizaron en un laboratorio certificado y acreditado.



Figura 1. Coprecipitación química para sintetizar nanopartículas de magnetita.

Preparación del adsorbente a base de la cascara de cacao

El procedimiento se realizó por medio de la técnica de preparación y elaboración de bioadsorbentes descrito por Cedeño y Vásquez (2024) describieron, pero con una modificación para evitar la degradación térmica. Tras el lavado exhaustivo con agua corriente para eliminar impurezas superficiales, el material luego fue trozado (aprox 2cm^2) y deshidratado en estufa a $55\text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas, temperatura seleccionada para preservar los grupos funcionales activos. El material seco fue triturado y tamizado utilizando tamices de ($250\text{ }\mu\text{m}$), ($150\text{ }\mu\text{m}$) y ($75\text{ }\mu\text{m}$), para homogeneizar la granulometría. La identificación de grupos funcionales se realizó mediante Espectroscopía Infrarroja (FTIR-ATR) bajo norma ASTM E1252.

Preparación de las mezclas y condiciones experimentales

Se prepararon mezclas físicas homogéneas de magnetita (Fe_3O_4) y cáscara de cacao, adaptando al método descrito por Coello et al. (2024) y Naranjo (2023). Se evaluaron tres dosis totales de adsorbente (0.5 g, 1.0 g y 2.0 g) en 500 mL que corresponderían de agua residual de relave, equivalentes a dosis de 1.0 g/L, 2.0 g/L y 4.0 g/L, respectivamente. Para cada dosis se establecieron y definieron cinco proporciones en base masa/masa (% m/m) entre la magnetita y cáscara de cacao en términos de masa de: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 y 0:100. La combinación de las tres dosis con las cinco proporciones generó y se obtuvieron un total de 15 tratamientos experimentales, cada uno de los cuales fue examinado y evaluado por triplicado ($n = 3$), lo que nos dio y así resultando en 45 unidades experimentales. La distribución detallada de las masas empleadas en cada tratamiento se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseño experimental de las mezclas nanopartículas de magnetita-cáscara de cacao.

Tratamientos	Dosis (g/L)	Masa total en 500 mL (g)	Proporción Fe_3O_4 :CC (% m/m)	Nanopartículas Magnetita (g)	Cáscara cacao (g)
T1	1	0.5	100:0	0.5	0
T2	1	0.5	75:25	0.375	0.125
T3	1	0.5	50:50	0.25	0.25
T4	1	0.5	25:75	0.125	0.375
T5	1	0.5	0:100	0	0.5
T6	2	1	100:0	1	0
T7	2	1	75:25	0.75	0.25
T8	2	1	50:50	0.5	0.5
T9	2	1	25:75	0.25	0.75
T10	2	1	0:100	0	1
T11	4	2	100:0	2	0

T12	4	2	75:25	1.5	0.5
T13	4	2	50:50	1	1
T14	4	2	25:75	0.5	1.5
T15	4	2	0:100	0	2

Nota: Fe₃O₄: Magnetita; CC: Cáscara de Cacao. Las proporciones se expresan en base masa/masa (% m/m). Cada tratamiento fue evaluado por triplicado (n = 3).

Procedimiento Experimental

Antes de llevar a cabo los ensayos, la muestra de efluente residual del relave aurífero fue sometida a un tratamiento por medio de la alcalinidad natural del efluente. Para este propósito, se añadió ácido nítrico al 25% para modificar el pH a un valor neutro de 7.3, próximo a la neutralidad. Para promover los mecanismos de coagulación, esta condición fue escogida (Pabón et al., 2020; Sánchez et al., 2024).

Las pruebas experimentales fueron realizadas mediante Test de Jarras, empleando 500 mL por cada muestra por unidad experimental. El procedimiento incluyó una fase rápida a 300 rpm durante 1 min, en la cual se adicionaron simultáneamente magnetita y cáscara de cacao en polvo, evaluándose tratamientos individuales (100 % cada material) y combinados en diferentes proporciones, después hubo una floculación lenta a 55 rpm durante 20 min. La etapa de sedimentación fue durante 20 minutos. Seguidamente, se ubicó un imán de neodimio en la base de cada recipiente con el propósito de atraer los flóculos hacia el fondo, favoreciendo la separación sólida - líquido y facilitando la recuperación del material adsorbente.

Posteriormente, con la finalidad de evaluar las características fisicoquímicas del agua, se registraron los valores de turbidez, conductividad

eléctrica y pH antes y después del tratamiento. Asimismo, se recolectaron alícuotas de 250 mL para cuantificar elementos metálicos de interés, como el hierro disuelto, arsénico, mercurio y zinc del agua clarificada posterior a la etapa de sedimentación y separación magnética. Las muestras fueron preservadas inmediatamente añadiendo HNO₃ hasta llegar a valores de pH inferiores a 2 y posteriormente almacenadas a 4°C para preservar su estabilidad. La evaluación química fue realizada en un laboratorio con acreditación empleando la técnica ICP-OES, bajo metodología EPA 200.7. Por último, se determinó la eficiencia del tratamiento calculando el porcentaje de remoción para cada parámetro usando la ecuación siguiente:

$$\% R = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100$$

Donde:

%R: Representa el valor porcentual de eficiencia de reducción.

C_i: Indica la concentración inicial registrada en el efluente previo al tratamiento.

C_f: Es la concentración residual después del proceso de tratamiento.

Diseño y Análisis Estadístico

El software RStudio fue el programa utilizado para procesar la información recolectada. Para examinar el impacto en la eficiencia de remoción de cinco proporciones de mezcla entre magnetita y cascara de cacao (100:0, 75:25, 50:50, 25:75 y 0:100), la evaluación estadística se realizó siguiendo un Diseño Completamente al Azar (DCA) y posteriormente se estudió independientemente cada nivel de dosis (1, 2 y 4 g/L). En todas las

pruebas, se consideró una confianza del 95% con un nivel significancia de ($p < 0.05$).

Resultados

Caracterización de nanopartículas de magnetita

La caracterización morfológica presente en las muestras sintetizadas fue analizada mediante SEM. A través de este análisis, se visualizaron las superficies del material bajo diferentes escalas de magnificación, específicamente a 1000X (Áreas 1, 2 y 3); 5000X (Áreas 4, 5 y 6); 4000X (Área 7) y 10000X (Área 8) las cuales se visualizan en la Figura 2.

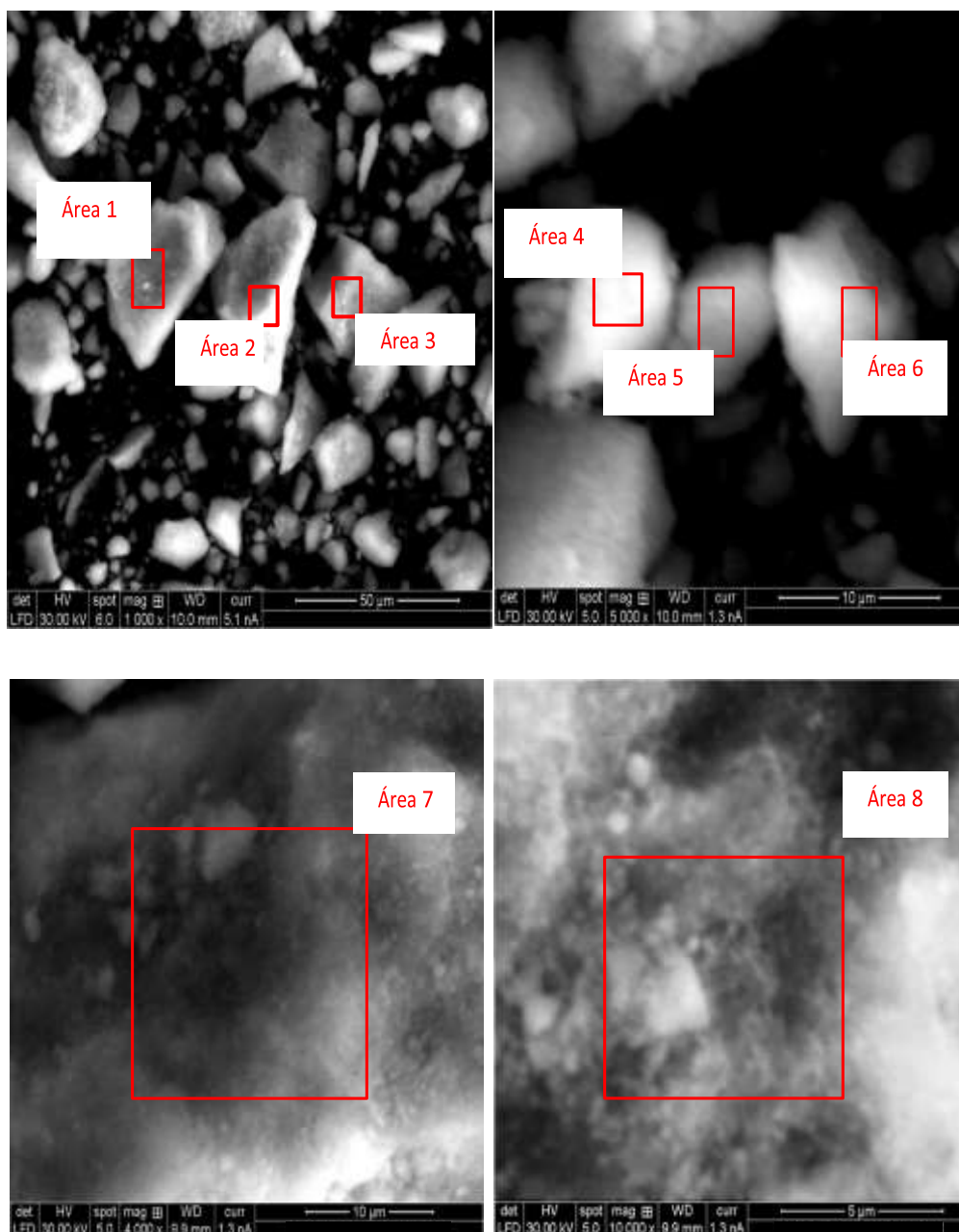


Figura 2. Micrografías SEM (1000X, 4000X, 5000X y 10000X) y ubicación de los puntos de análisis EDS

Se empleó EDS para determinar el contenido elemental de Fe_3O_4 sintetizadas. En la tabla 2 se presenta de manera detallada la cuantificación porcentual de los elementos que componen el conjunto, calculada en las

diferentes ubicaciones de muestreo elegidas (Áreas 1 a 8), se presenta en la Tabla 2

Tabla 2. Análisis elemental de las muestras por SEM – EDS.

Elemento identificado	Contenido porcentual %							
	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6	Area 7	Area 8
Oxígeno, O	17.53	22.54	22.80	29.08	22.50	33.83	18.40	22.38
Hierro, Fe	82.47	77.46	77.20	70.92	77.50	66.17	81.60	77.62

La identificación de fases cristalinas fue llevada a cabo mediante DRX fue efectuada empleando un equipo PANalytical (Modelo AERIS) se establecieron la cristalinidad y la estructura de la magnetita sintetizada en un intervalo angular de 5° a 80° (2θ). La tabla 3 muestra las fases cristalinas que se identificaron, mientras que el patrón de difracción se puede ver en la Figura 3.

Tabla 3. Composición cuantitativa de las fases cristalinas identificadas en el material sintetizado.

Componente Identificado	Fórmula Química	Unidad	Resultados
Magnetita	Fe _{24.00} O _{32.00}	%	50.50
Fe ₃ O ₄	Fe _{24.00} O _{32.00}	%	38.00
Magnesioferrite	Mg _{8.00} Fe _{16.00} O _{32.00}	%	0.60
Jadeite	Na _{2.12} Ca _{1.88} Al _{2.08} Fe _{1.92} Si _{8.00} O _{24.00}	%	10.90

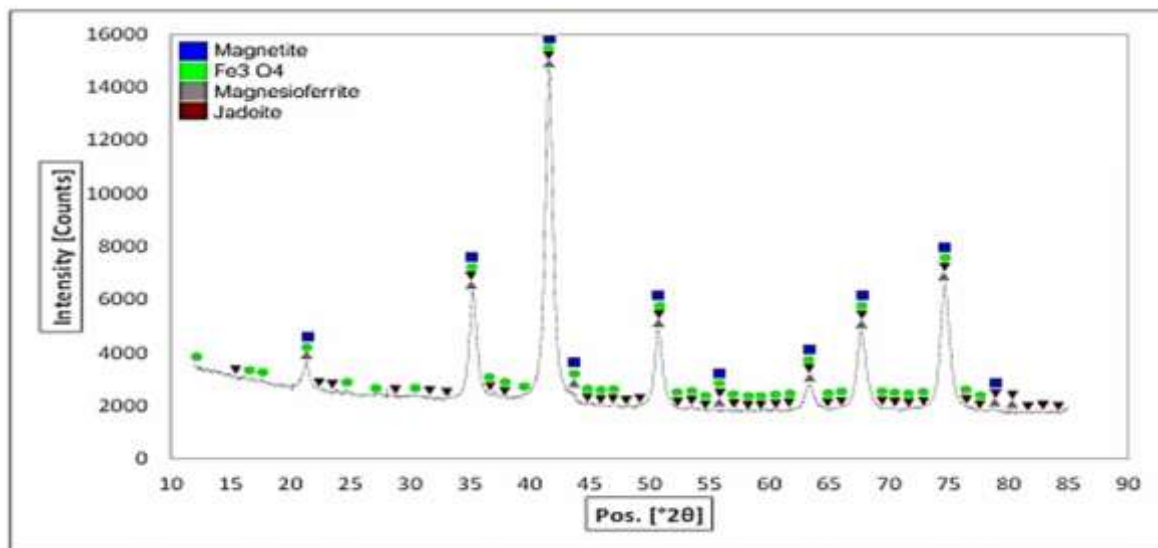


Figura 3. Difractograma de rayos X y fases cristalinas identificadas.

Caracterización de Cáscara de Cacao

La caracterización fue efectuada utilizando la técnica FTIR-ATR con el fin de caracterizar los grupos funcionales superficiales empleando un equipo Perkin Elmer en el intervalo 450 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} . En la tabla 4, detalla la identificación de bandas espectrales y su respectiva asignación química, mientras que el espectro vibracional conseguido, se aprecia en la Figura 4.

Tabla 4. Caracterización de los grupos funcionales identificados en la cáscara de cacao mediante análisis FTIR-ATR.

Vibración	Grupo funcional identificado	Intervalo Teórico (cm^{-1})	Valor experimental (cm^{-1})	Asignación Química
Tensión	O - H	3400-3200	3332	Hidroxilo(O-H)
Tensión	C-H	2950-2800	2924	Grupos metilo (-CH ₃) o metileno (-CH ₂)
Tensión	C=O	1790-1688	1738	Carbonilo (C=O)
Tensión	-COOH	1685-1600	1602	Ácido carboxílico

Flexión	C-H	1410-1300	1371	Grupos metilo y metileno
Tensión	C-O	1300-1000	1050	Enlace glicosídico (Celulosa)

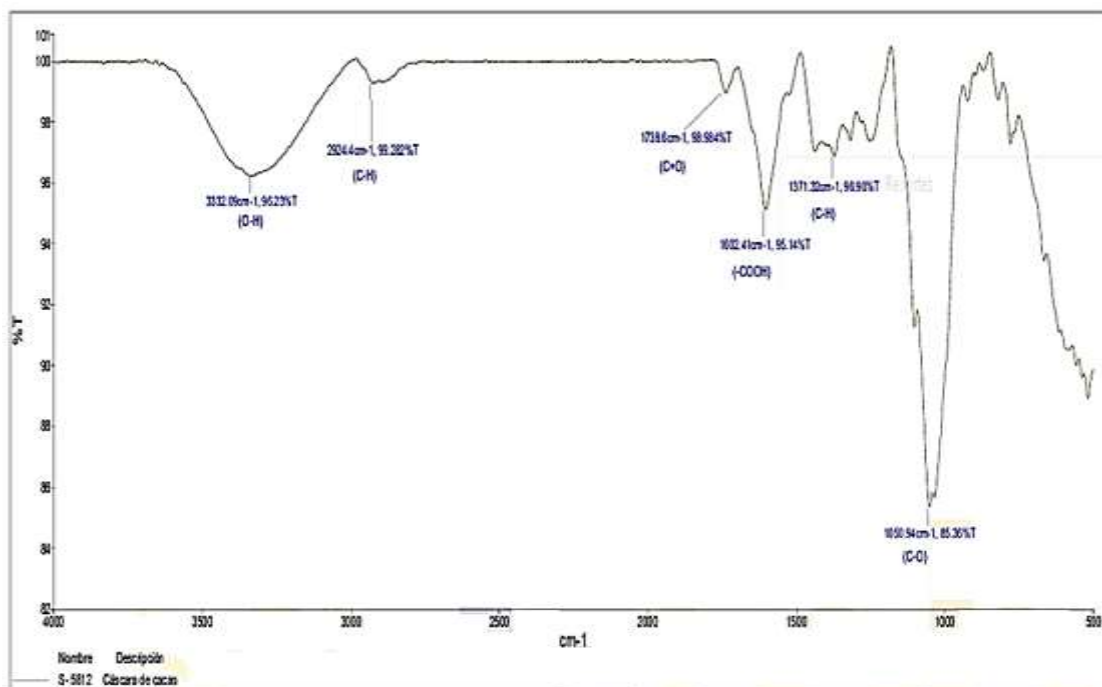


Figura 4. Análisis FTIR-ATR de la cascara de cacao.

Caracterización inicial del agua de relave minero

La tabla 5 presenta una descripción inicial del efluente real, que fue recolectado en el área de la Rinconada (Puno). Los hallazgos muestran una evaluación directa con respecto a la normativa en vigor, resaltando de manera visual aquellos parámetros críticos que sobrepasan los límites fijados y que necesitan un tratamiento prioritario.

Tabla 5. Caracterización inicial del agua de relave minero comparada con los LMP.

Parámetro	Unidad	Valor Inicial	LMP Minería (Descarga)	Diagnóstico Inicial
Arsénico	mg/ L	0.545	0.1	Excede
Cadmio	mg/ L	< 0.0005	0.05	Cumple
Cobre	mg/ L	1.107	0.5	Excede
Hierro	mg/ L	5.740	2	Excede
Mercurio	mg/ L	0.298	0.002	Excede
Plomo	mg/ L	0.159	0.2	Cumple
Zinc	mg/ L	0.562	1.5	Cumple
pH	-	12.88	6.0 - 9	Alcalino
Turbiedad	UNT	391	-	Alta turbidez
Conductividad	ms/cm	6.5	-	Alta conductividad

Evaluación experimental después del tratamiento

Se llevaron a cabo quince ensayos utilizando dosis de 1.0, 2.0 y 4.0 g/L en cinco proporciones Magnetita: Cacao (100:0, 75:25, 50:50, 25:75 y 0:100). Los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad, temperatura y turbiedad) y los niveles de metales pesados obtenidos después del tratamiento se detallan en la Tabla 6, los porcentajes de eficiencia de remoción obtenidos detallan en la Tabla 7.

Tabla 6. Características fisicoquímicos y concentración de metales pesados del agua posterior al tratamiento.

Tratamiento	Dosis (g/L)	Proporción (Fe ₃ O ₄ :CC) (% m/m)	pH	CE (ms/cm)	T (°C)	Turbidez (UNT)	As (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)
T1	1	100:0	7.03	6.38	17.9	8.85	0.069	0.055	0.713
T2	1	75:25	6.06	6.15	17.5	5.36	0.065	0.321	0.262
T3	1	50:50	6.93	6.36	17.2	4.35	0.082	0.039	1.534
T4	1	25:75	7.06	6.41	16.9	5.85	0.075	0.069	0.277
T5	1	0:100	6.95	6.26	15.9	10.07	0.053	0.03	0.303
T6	2	100:0	7.32	6.21	18.4	30	0.075	0.046	0.836
T7	2	75:25	6.93	6.24	17.9	11.07	0.068	0.041	0.315

T8	2	50:50	7.18	6.30	17.3	10.01	0.053	0.038	0.323
T9	2	25:75	6.89	6.21	17.93	11.07	0.069	0.041	0.356
T10	2	0:100	6.95	6.35	18.13	28.69	0.067	0.037	0.514
T11	4	100:0	7.35	6.14	17	12.09	0.042	0.056	0.452
T12	4	75:25	7.12	6.19	16.77	89.25	0.079	0.056	1.471
T13	4	50:50	6.86	6.13	17.33	154.7	0.100	0.08	2.296
T14	4	25:75	6.71	6.17	17.87	136.3	0.095	0.059	1.599
T15	4	0:100	6.63	6.45	16.83	131.7	0.108	0.04	1.543

Nota: Fe₃O₄: Magnetita; CC: Cáscara de Cacao y CE: Conductividad Eléctrica. Las proporciones se expresan en base masa/masa (% m/m). El Mercurio (Hg) se excluye de la tabla principal dado que sus concentraciones finales se registró un valor inferior a la capacidad de detección del equipo (< 0.0004 mg/ L) en todos los tratamientos.

Tabla 7. Eficiencia de disminución de turbidez y metales pesados.

Tratamiento	Dosis (g/L)	Proporción (Fe ₃ O ₄ :CC) (% m/m)	Remoción Turbidez (%)	Remoción As (%)	Remoción Cu (%)	Remoción Fe (%)
T1	1	100:0	97.74	87.34	95.03	87.58
T2	1	75:25	98.63	88.44	70.99	95.39
T3	1	50:50	98.90	85.14	96.48	73.41
T4	1	25:75	98.50	86.24	93.72	95.24
T5	1	0:100	97.42	90.46	97.29	94.73
T6	2	100:0	92.33	86.24	95.84	85.70
T7	2	75:25	97.17	87.52	96.30	94.63
T8	2	50:50	97.44	90.46	96.57	94.46
T9	2	25:75	97.17	87.16	96.30	93.90
T10	2	0:100	92.66	87.89	96.66	91.03
T11	4	100:0	96.91	92.48	94.94	92.24
T12	4	75:25	77.17	85.50	94.94	75.01
T13	4	50:50	60.44	81.65	92.77	60.02
T14	4	25:75	65.13	82.57	94.67	72.75
T15	4	0:100	66.32	80.18	96.39	73.62

Nota: Fe₃O₄: Magnetita; CC: cáscara de cacao. Las proporciones se expresan en base masa/masa (% m/m). La eficiencia del Mercurio (Hg) se omite por ser superior al 99% en todos los casos.

El análisis gráfico de los resultados se muestra a continuación. Los gráficos 5-8 muestran las concentraciones residuales promedio del contaminante mediante barras y sobre cada barra se puede observar el porcentaje de eficiencia alcanzando, lo que posibilita el análisis del impacto de la dosis y la proporción en cada tratamiento.

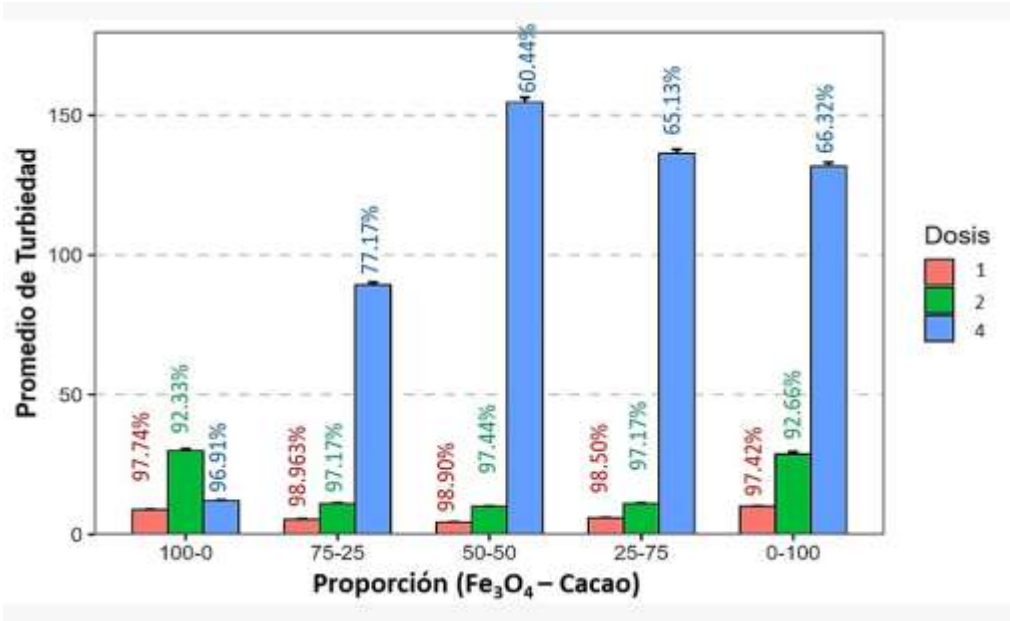


Figura 5. Promedio de turbidez y porcentaje de remoción en función de la dosis y proporción.

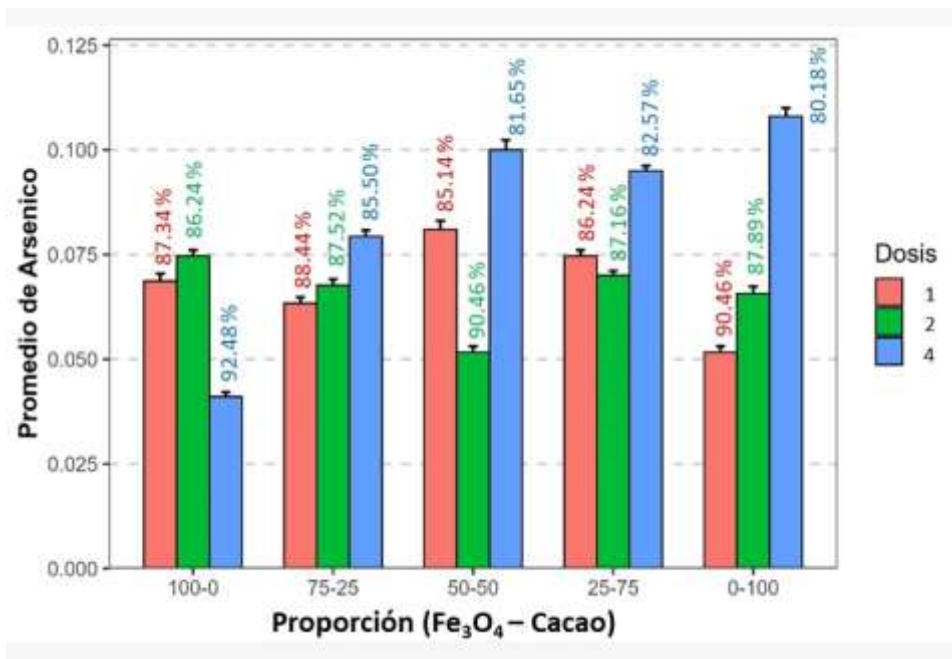


Figura 6. Promedio de Arsénico y porcentaje de remoción evaluando dosis y proporción.

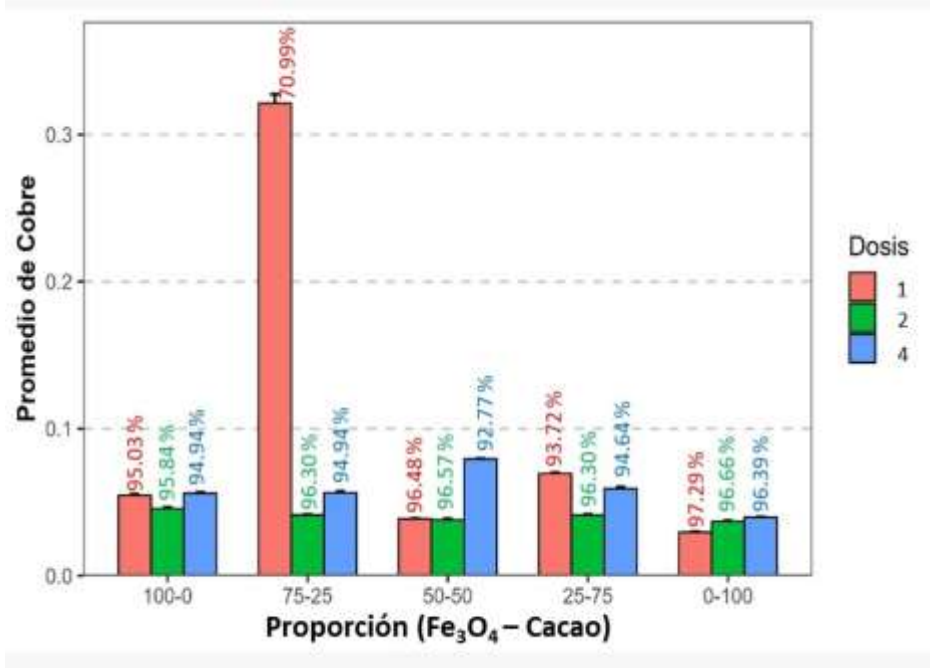


Figura 7. Promedio de Cobre y porcentaje de eficiencia según la dosis y proporción.

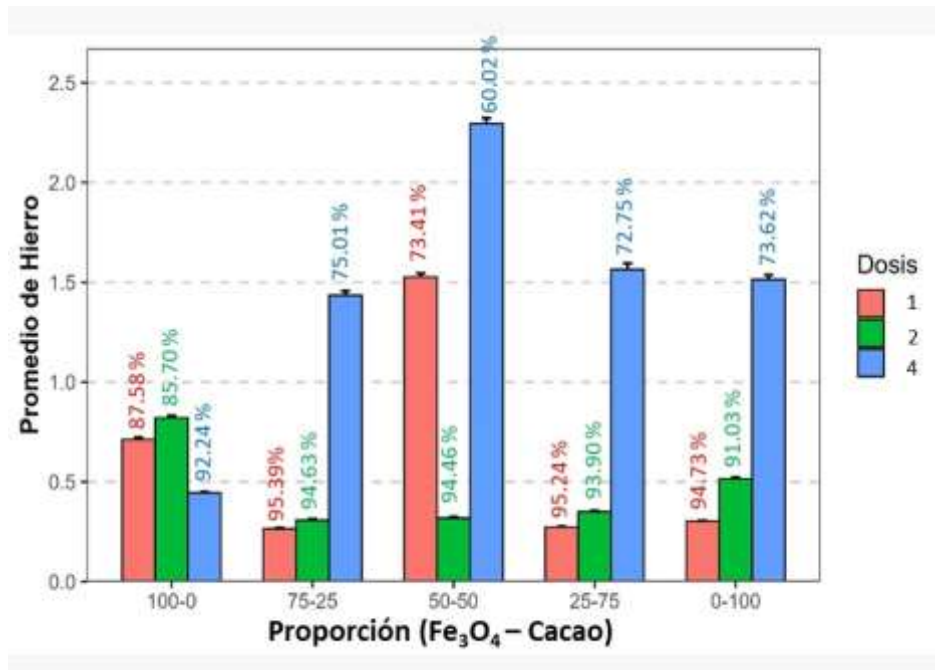


Figura 8. Promedio de Hierro y porcentaje de eficiencia en función de la dosis y proporción.

Análisis estadístico de las variables evaluadas

La tabla 8, presenta con detalle el análisis estadístico de características fisicoquímicas y metales pesados. Esta evaluación se desarrollo considerando las dosis y proporciones utilizadas. Los resultados mostraron diferencias muy significativas, asumiendo una confianza del 95% ($p < 0.05$).

Tabla 8. Evaluación estadística de parámetros fisicoquímicos y metales según dosis y proporción.

Dosis	Proporción (Fe ₃ O ₄ :CC)	pH	CE (ms/cm)	Turbidez (UNT)	T (°C)	As (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)
1 g/L	100-0	7.03 ± 0.20 ^{ns}	6.38 ± 0.17 ^{ns}	8.85 ± 0.23 ^b	17.9 ± 0.4 ^a	0.71 ± 0.02 ^{****}	0.07 ± 3.06e-3 ^{bc}	0.05 ± 1.53e-3 ^{ns}
1 g/L	75-25	6.60 ± 0.24 ^{ns}	6.15 ± 0.11 ^{ns}	5.36 ± 0.25 ^c	17.5 ± 0.5 ^a	0.26 ± 0.01 ^{ns}	0.06 ± 2.52e-3 ^c	0.32 ± 1.10e-2 [*]
1 g/L	50-50	6.93 ± 0.30 ^{ns}	6.36 ± 0.20 ^{ns}	4.32 ± 0.20 ^d	17.2 ± 0.7 ^{ab}	1.53 ± 0.03 ^{****}	0.08 ± 3.61e-3 ^a	0.04 ± 7.51e-4 ^{ns}
1 g/L	25-75	7.06 ± 0.21 ^{ns}	6.41 ± 0.20 ^{ns}	5.85 ± 0.26 ^c	6.9 ± 0.2 ^{ab}	0.27 ± 0.01 ^{ns}	0.07 ± 2.52e-3 ^{ab}	0.07 ± 1.35e-3 ^{ns}
1 g/L	0-100	6.95 ± 0.24 ^{ns}	6.26 ± 0.15 ^{ns}	10.1 ± 0.3 ^a	15.9 ± 0.7 ^b	0.30 ± 0.01 ^{****}	0.05 ± 2.52e-3 ^d	0.03 ± 8.51e-4 [*]
Valor p		0.217	0.386	1.87e-10	7.24e-3	2.72e-7	2.18e-06	9.07e-3
2 g/L	100-0	7.32 ± 0.10 ^a	6.21 ± 0.17 ^{ns}	30.0 ± 1.08 ^{ns}	18.4 ± 0.30 ^{ns}	0.82 ± 0.02 ^a	0.07 ± 2.52e-3 ^a	0.05 ± 1.53e-3 ^a
2 g/L	75-25	6.93 ± 0.24 ^{ab}	6.24 ± 0.18 ^{ns}	11.1 ± 0.26 ^a	17.9 ± 0.75 ^{ns}	0.31 ± 1.11e-2 ^d	0.06 ± 2.52e-3 ^b	0.04 ± 8.00e-4 ^b
2 g/L	50-50	7.18 ± 0.17 ^{ab}	6.30 ± 0.25 ^{ns}	10.0 ± 0.32 ^a	17.3 ± 0.45 ^{ns}	0.32 ± 1.21e-2 ^{cd}	0.05 ± 2.52e-3 ^c	0.03 ± 1.46e-3 ^c
2 g/L	25-75	6.89 ± 0.16 ^b	6.21 ± 0.15 ^{ns}	11.1 ± 0.27 ^a	17.9 ± 0.35 ^{ns}	0.35 ± 9.54e-3 ^c	0.07 ± 2.00e-3 ^{ab}	0.03 ± 1.01e-3 ^b
2 g/L	0-100	6.95 ± 0.08 ^{ab}	6.35 ± 0.25 ^{ns}	28.7 ± 1.59 ^{ns}	18.1 ± 0.65 ^{ns}	0.51 ± 1.52e-2 ^b	0.06 ± 3.06e-3 ^b	0.04 ± 1.07e-3 ^c
Valor p		2.89e-2	0.895	1.07e-5	0.216	3.16e-12	7.74e-06	4.07e-05
4 g/L	100-0	7.35 ± 0.30 ^a	6.14 ± 0.13 ^{ns}	12.1 ± 0.30 ^d	17.0 ± 0.30 ^{ns}	0.45 ± 0.01 ^d	0.04 ± 2.00e-3 ^d	0.05 ± 1.14e-3 ^b
4 g/L	75-25	7.12 ± 0.23 ^{ab}	6.19 ± 0.25 ^{ns}	89.3 ± 1.65 ^c	16.8 ± 0.45 ^{ns}	1.43 ± 0.04 ^c	0.08 ± 2.52e-3 ^c	0.06 ± 1.91e-3 ^b
4 g/L	50-50	6.86 ± 0.14 ^{ab}	6.13 ± 0.15 ^{ns}	155 ± 3.05 ^a	17.3 ± 0.45 ^{ns}	2.29 ± 0.05 ^a	0.10 ± 4.00e-3 ^b	0.08 ± 8.02e-4 ^a
4 g/L	25-75	6.71 ± 0.15 ^b	6.17 ± 0.16 ^{ns}	136 ± 2.51 ^b	17.9 ± 0.65 ^{ns}	1.56 ± 0.06 ^b	0.09 ± 2.00e-3 ^b	0.05 ± 2.30e-3 ^b

4 g/L	0-100	6.63 ± 0.08 ^b	6.45 ± 0.21 ^{ns}	132 ± 2.52 ^b	16.8 ± 0.70 ^{ns}	1.51 ± 0.04 ^{bc}	0.10 ± 3.61e-3 ^a	0.04 ± 8.00e-4 ^c
Valor p		6.09e-3	0.26	1.97e-14	0.147	2.23e-12	6.36e-10	4.62e-10

Nota: Fe₃O₄: Magnetita; CC: Cáscara de Cacao; CE: Conductividad Eléctrica. Datos expresados como Media ± D.E. (n=3). Valor p: Significancia estadística global. Letras minúsculas diferentes (^{a-e}) y símbolos (****, *) evidencian diferencias significativas ($p < 0.05$) conforme a las pruebas de comparación múltiple correspondientes Tukey, Games-Howell o Dunn aplicadas en función de la normalidad y homogeneidad de varianzas. ^{ns}: no significativo.

Discusión

Caracterización de Nanopartículas de Magnetita

En cuanto a la morfología, el análisis SEM nos indica que son nanopartículas globulares en el rango de 20 a 60 nm, nos indica un tamaño consistente con los hallazgos de García y Gonzalez (2021). Esta diferencia frente a los tamaños más pequeños (<15nm) obtenidos por Rajput et al. (2016) y Rojas (2017), resulta ser una buena ventaja, ya que, al ver que nuestras partículas son ligeramente más grandes, es mucho más fácil poder recuperarlas con el imán y no se dispersan ni se pierden en el agua como suele pasar con las partículas muy finas. Además, la aglomeración que es observada coincide plenamente con lo descrito por García y Gonzalez (2021), Marimon (2018) y Rajput et al. (2016), los cuales son quienes explican que este fenómeno no es un defecto, sino es una respuesta natural a las fuertes interacciones magnéticas dipolo-dipolo junto con las fuerzas de Van der Waals. De hecho, esta estructura resulta beneficiosa, ya que genera una porosidad entre las partículas que facilita la captura física de los contaminantes.

El análisis EDS nos demuestra la pureza composicional del material, revelando tiene un contenido de Hierro entre 66.17 y 82.47%; y Oxígeno presento valores entre 17.53 y 33.83%. Esta distribución elemental concuerda con la composición característica de la magnetita reportados por Garcia y Gonzalez (2021) y coinciden con la estequiometría teórica descrita por Rajput et al. (2016). Estos resultados confirman que el material sintetizado presenta una composición química acorde de la Fe_3O_4 .

El análisis por DRX permitió identificar la pureza en un 88.5% de magnetita (Fe_3O_4); este valor supera significativamente la pureza del 52.78% reportado por Sánchez et al. (2024) bajo condiciones similares. Esta diferencia podría estar relacionada particularmente con el uso de una atmósfera inerte de nitrógeno (N_2) la cual habría contribuido a disminuir procesos de oxidación que Rajput, Pittman y Mohan (2016) que señalan como el principal factor asociado del deterioro de la eficiencia magnética. Asimismo, la elevada intensidad observada del pico en el plano (311), es característico de la estructura de espinela cúbica inversa de la magnetita, que coincide con lo descrito por Rojas (2017) y sugiere un grado alto de cristalinidad. De acuerdo con Pilicita (2020), la exposición de estos sitios activos de esta estructura es favorable para la adsorción de metales.

Caracterización de cáscara de cacao

La caracterización FTIR-ATR confirmó la identificación de diversos grupos funcionales activos en la cascara de cacao, característicos de materiales lignocelulósicos. Entre ellos se destacó una banda amplia situada en el intervalo $3300 - 3400 \text{ cm}^{-1}$ correspondientes al estiramiento de enlaces (-OH) presentes en grupos de hidroxilo en componentes como celulosa, lignina y pectina. Estos resultados fueron similares con lo reportado por Soto (2019) y

Tejada, Villabona y Gonzalez (2022) quienes relacionan esta banda con la capacidad de interacción de estos grupos funcionales con especies metálicas en una solución acuosa.

Asimismo, se identificó una banda en la región de 2900–2950 cm^{-1} , atribuida a enlaces C-H que corresponden a grupos de metilo y metileno. De acuerdo con Tejada, Villabona y Gonzalez (2022) la presencia de estos grupos es común en materiales ricos en lignina y pectina, componentes que le dan estabilidad estructural a la cáscara de cacao. A su vez, la señal intensa alrededor de 1050 cm^{-1} (C-O-C) confirma su naturaleza fibrosa, según Coello-Cabezas et al. (2024) determina la conservación de esta señal que demuestra el tratamiento químico no a dañado la matriz del material, manteniendo una red resistente capaz de soportar la agitación mecánica.

Por otro lado, la capacidad del material para poder limpiar el agua que a quedó demostrada por los picos en 1738 cm^{-1} y 1602 cm^{-1} que corresponden a grupos funcionales carbonilo (C=O). Estos resultados coinciden con Cedeño y Vásquez (2024) y Soto (2019), los cuales son quienes explican que estos grupos funcionan como puntos de anclaje que atrapan y retienen a los iones metálicos, para poder así facilitar la remoción del contaminante mediante el proceso de intercambio iónico y también la fijación química. Finalmente, esta combinación de estabilidad física y capacidad química valida la calidad del adsorbente. Esta funcionalidad explica la alta eficiencia que es observada en nuestro estudio, tal como lo reportan Carranza y Pinchi Del Aguila (2023); Cedeño y Vásquez (2024) y Soto (2019), exponiendo que la cáscara de cacao en su estado natural es una alternativa capaz y económica para la remediación de efluentes.

Caracterización inicial del agua de relave minero

La identificación inicial del efluente de relave minero de La Rinconada evidencia concentraciones elevadas de Arsénico (0.545 mg/ L), Cobre (1.107 mg/ L), Hierro disuelto (5.740 mg/ L) y Mercurio (0 .298 mg/L), excediendo los Límites Máximos Permisibles para las descargas mineras, mientras que Pb y Zn se mantuvieron dentro de los valores permitidos. Estos resultados comprueban la presencia de una contaminación metálica significativa, característica de efluentes mineros sin tratamiento previo. La alta turbidez registrada (391 UNT) y la elevada conductividad eléctrica (6.5 mS/cm) que nos indican una resistente carga de sólidos en suspensión y sales disueltas, lo que coincide con lo reportado para relaves mineros generados en fases de beneficio. El pH fuertemente alcalino (12.88) que contrasta con lo reportado por Zapata (2022), quien registró un pH ácido (3.5) característico del drenaje ácido de mina natural en muestras provenientes directamente de la mina Rinconada-Puno.

Este contraste se puede atribuirse con el origen del efluente que fue analizado en el presente estudio, el cual proviene de una planta de beneficio donde el uso de insumos químicos, como el cemento y detergentes, genera condiciones altamente alcalinas. No obstante, ambos estudios coinciden en la severidad de la contaminación, ya que Zapata (2022) demostró una conductividad eléctrica de 3.24 mS/cm y concentraciones extremas de metales tóxicos, como As (11.007 mg/L) y Hg (11.875 mg/L), lo que evidencia que, independientemente de la etapa del proceso minero, la contaminación metálica en La Rinconada es persistente y representa un riesgo ambiental significativo. Bajo estas condiciones, los resultados alcanzados justifican la importancia de implementar tecnología de tratamiento eficientes enfocadas

en depurar la carga metálica de los efluentes provenientes de la extracción del oro.

Evaluación experimental después del tratamiento

Para la clarificación del agua, la dosis optima de 1.0 g/L con proporción 50:50 (Magnetita-Cacao) fue la más eficiente, alcanzando un 98.9% (4.35 UNT). Este desempeño supera los valores reportados por Pinchi Del Aguila et al., (2022) investigadores que al tratar las aguas servidas domesticas utilizando solo harina de cacao (600–1000 mg/L) obtuvieron eficiencias limitadas (45–50%) debido a la lenta sedimentación de la biomasa. Por su parte, Daviran (2021) logró un 91.2% trabajando con dosis bajas de 15 a 25 ppm en el Río Chillón. El mejor desempeño observado puede atribuirse a la presencia de magnetita, que actúa como agente desinfectante, acelerando así la sedimentación por la atracción magnética y resolviendo la lentitud de los métodos tradicionales, un efecto validado también por los autores Estupiñan y Bermúdez (2019) al modificar el coagulante de Moringa con nanopartículas magnéticas.

Por el contrario, la eficiencia que a disminuido notoriamente en las dosis que se realizaron de 2.0 y 4.0 g/L. Esta conducta puede juntar a fenómenos de sobredosificación, que generan re estabilización de las cargas superficiales, para poder impedir así la aglomeración de partículas. Asimismo, el exceso de biomasa induce la lixiviación de taninos, los cuales colorean el efluente, un fenómeno que concuerda con lo reportado por Verdezoto (2023) y Coello-Cabezas et al. (2024).

Respecto a la remoción de Hierro, se alcanzó una eficiencia máxima del 95.39% con la dosis de 1.0 g/L en proporción 75:25 (Magnetita: Cacao). Este

resultado demuestra que el método es tan eficiente como las tecnologías avanzadas de nano separación. El estudio de El-Sayed y Abdulhady (2015) consiguieron una remoción del 99.89% de hierro en aguas residuales industriales, aunque tuvieron que sintetizar un nanocompuesto bastante complejo de Magnetita recubierta con TiO_2 . Frente a ello, nuestro estudio logra una eficiencia de rendimiento muy similar (>95%) a través de una mezcla física simple combinada con un residuo agroindustrial, lo que reduce significativamente la complejidad de síntesis y los costos. Además, nuestros resultados coinciden con lo descrito por Rapeta, Maree y Msagati (2024), quienes en el tratamiento de efluentes mineros con características ácidas, lograron remociones de hierro entre 88.4% y 97.6% mediante procesos de precipitación alcalina regulada.

Nuestro sistema híbrido de Magnetita-Cacao alcanza estos niveles de eficiencia trabajando con una matriz real de relave nos sugiere añadir biomasa no interfiere con la precipitación del hierro, sino que al contrario actúa sinérgicamente capturando iones residuales y facilitando la separación magnética del lodo. Este comportamiento puede explicarse porque el hierro disuelto tiende a formar especies hidrolizadas que favorecen procesos de precipitación alcalina. En este escenario, la magnetita funciona como nucleación facilitando así la agregación, mientras que la biomasa complementa la captura mediante las interacciones superficiales con los grupos funcionales orgánicos. Este trabajo en conjunto explica porque se dio un mejor rendimiento en la proporción 75:25. Además, este comportamiento demuestra que la combinación de ambos elementos no solo suma sus efectos por separados, si no que se mejoran por completo los procesos de nucleación, precipitación y adsorción en la superficie.

Para la remoción de Cobre (Cu), el sistema llegó a una eficiencia del 97.3% (0.030 mg/L) utilizando la dosis de 1 g/L con 100 % de cascara de

cacao, esto confirma la gran afinidad biológica que tienen los grupos funcionales de la cascara de cacao hacia este metal. Es importante destacar, según los datos de la Tabla 7, que la magnetita pura también demostró una alta capacidad de remoción por sí sola (alcanzando 94.94% a 4 g/L), lo cual nos confirma que las nanopartículas pueden y participan activamente en la captación de iones de Cu. Sin embargo, usar solo exclusivo de la biomasa (0:100) pudo superar este rendimiento utilizando una de las dosis de cuatro veces menor, este resultado demuestra y representa una alternativa factible en términos operativos y de sostenibilidad frente a lo reportado por Garcia y Gonzalez (2021), quienes trataron agua de producción petrolera (3.81 mg/L de Cu) logrando una remoción del 98.68% con nanopartículas de magnetita; sin embargo, su tratamiento requirió una dosis de 4.5 g/L (0.9 g/200 mL) de magnetita pura. Además, la eficiencia obtenida fue mucho mayor que contrasta notablemente con el desempeño de otros bioadsorventes, superando el 66.67% reportado por Ramirez (2016), quien realizó el empleo de biomasa residual de naranja activada a una dosis de 5 g/L en la laguna Colquicocha. Por otro lado, Iconaru et al. (2016) reportaron una adsorción de 10.67 mg/g de Cu (II) con nano-magnetita (pH 5, 10 g/L), destacando que la nano-estructuración mejoró la eficiencia en un 17.7% frente a la comercial (9.06 mg/g).

La mayor eficiencia observada para el cacao puede explicarse debido a la abundancia de sitios activos de grupos carboxilo y fenoles en la estructura lignocelulósica, donde presentan alta afinidad por cationes divalentes como Cu^{2+} mediante mecanismos de quelación y complejación superficial. Por otra parte, aunque la magnetita interviene de forma activa en la adsorción, su mecanismo es sobre todo electrostático, lo que explica la pequeña diferencia que se nota entre ambos materiales.

Para la remoción de Arsénico, la máxima eficiencia fue del 92.48% se alcanzó con la dosis de 4 g/L de magnetita pura, tomando como base una concentración inicial de 0.545 mg/ L. Este resultado coincide con los datos descritos por Monárrez et al. (2016), quienes lograron remociones de 87% para As^{+3} y 98% para As^{+5} en aguas sintéticas con dosis bajas (0.1 g/L) y valores mucho menores 0.164 mg/L. Asimismo, aunque Tapia y Huanca (2019) reportaron una remoción por encima del 98% en aguas del Río Tambo con una concentración inicial de 0.23 mg/L, dicho eficiencia requirió soportar el óxido de hierro en Zeolita además de utilizar una dosis muy alta de 50 g/L. En comparación, el método propuesto logra alcanzar un desempeño competitivo (>92%) empleando una dosis doce veces más baja 4 g/L, lo que demuestra una respuesta favorable respecto a la cantidad de material utilizado. Esta alta capacidad de captura concuerda con los resultados obtenidos por Iconaru et al. (2016), quienes reportaron una capacidad límite de adsorción de 66.53 mg/g, demostrando así la nano-estructuración del material eleva su efectividad en un 69.46% si se compara con la magnetita comercial. Esto justifica el desempeño los buenos resultados obtenidos con nuestras nanopartículas.

La mayor afinidad de la magnetita hacia el arsénico se explica por enlaces de hidroxilos presentes en la superficie ($\equiv Fe - OH$), con la propiedad de formar complejos internos con especies arsenicales aniónicas como AsO_4^{3-} y AsO_3^{3-} . Este mecanismo de adsorción específica favorece la retención del arsénico en comparación con la biomasa, cuyos grupos funcionales muestran mayor selectividad hacia cationes metálicos. A raíz de esto, la magnetita pura presentó resultados más favorables en este caso.

En cuanto a la remoción de Mercurio, lograr que la concentración final este por debajo del límite de detección analítica (< 0.0004 mg/ L) confirma una alta eficiencia del método bajo un entorno operativo real. Este desempeño

va del par con los hallazgos descritos por Sánchez et al. (2024), autores que alcanzaron una eficiencia de remoción del 99.99% empleando magnetita pura comercial, De igual manera, coincide con los resultados descritos por Rahbar et al. (2014) quienes reportaron que las nanopartículas magnéticas modificadas con quitosano fueron capaces de remover un 99.9% a pH 5, aplicando una dosis de 0.67 g del material partiendo de un valor inicial de 2-8 mg/L. con todo esto es fundamental recalcar una diferencia clave que los estudios citados, realizaron el estudio con aguas sintéticas controladas en laboratorio. En cambio, esta investigación demuestra la eficacia del material en condiciones reales de aguas de relave minero, dejando en claro que la elevada carga iónica característica de este tipo de efluentes no afecto los sitios activos ni bloqueo el proceso de adsorción.

Asimismo, la eficiencia de remoción alcanzados fue superior a los estudios reportados en diversas investigaciones que emplearon bioadsorbentes o mezclas de coagulantes. Verdezoto (2023), obtuvo valores moderados de 32.86% y 68.91% en aguas sintéticas (2000 y 11g/L) con una combinación de magnetita y cáscara de cacao de 13.3 ml/L. Por otro lado, nuestro sistema también muestra una ventaja clara frente a la Moringa oleífera reportado por Chen et al. (2021) donde la remoción alcanzó a un 81.6% en soluciones con concentraciones a partir 2.5 a 1000 mg/L. Por último, los resultados obtenidos presentan concordancia con el comportamiento de adsorción descrito por Naranjo (2023), quien propuso un rango de dosis entre 0.5 a 1.5 g utilizando magnetita sintetizada vía verde con extracto de cacao, se alcanzó un 88.14% de remoción con la dosis de 1.5 g/L partiendo de una concentración inicial de 110 µg/L en agua sintética.

De manera general, los valores registrados demuestran que la eficiencia de remoción no dependió únicamente de la cantidad de dosis del material administrado, sino también de las características de contacto entre el

contaminante y el material utilizado para la adsorción. En ese sentido, la magnetita pura presentó una mejor afinidad en la remoción de arsénico, lo que podría estar relacionado con la afinidad de este material por especies metaloides presentes, facilitando el proceso de adsorción superficial específica en sus grupos hidroxilo activos. En cambio, la cáscara de cacao presentó mayor capacidad de interacción con el cobre, posiblemente debido a la presencia de grupos funcionales orgánicos que son capaces de retener iones metálicos mediante diferentes mecanismos de quelación y complejación superficial. Por otro lado, las combinaciones Magnetita y cascara de cacao mostraron resultados sinérgicos muy favorables en la remoción de hierro y turbidez, potenciando al mismo tiempo los procesos de nucleación, precipitación alcalina, adsorción superficial y separación magnética del material sedimentado. De igual manera, aunque la mayoría de los tratamientos evaluados mostraron eficiencias altas de remoción, este comportamiento observado dependió de las características de cada contaminante tratado como también de la capacidad de adaptación de cada material utilizado en aguas de relaves mineros reales.

Análisis estadístico de las variables evaluadas

El análisis estadístico indicó que los valores de el pH no evidenciaron diferencias significativas en la dosis de 1.0 g/L ($p > 0.05$). Sin embargo, en las dosis de 2.0 y 4.0 g/L sí se identificaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) en los tratamientos. Respecto a la conductividad eléctrica no se identificaron diferencias significativas en ninguna de las dosis analizadas. Por otro lado, la temperatura presentó significancia estadística únicamente en la dosis de 1.0 g/L. Respecto a la turbidez y las concentraciones

de arsénico, hierro disuelto y cobre se identificaron diferencias altamente significativas ($p < 0.05$) en todas las dosis, indicando un impacto de la proporción empleada en la capacidad de remoción. Para el Mercurio, no fue posible establecer diferencias significativas debido a que sus concentraciones fueron menores al límite de detección del método empleado.

Conclusiones

En conclusión, los datos obtenidos permitieron observar que tanto la magnetita (Fe_3O_4) como la cáscara de cacao (CC), aplicadas ya sea de manera individualmente o combinado por ambos materiales, lograron una eficiencia elevada en la remoción de arsénico, cobre, hierro disuelto y mercurio presentes en efluentes de relave minero.

La magnetita pura mostro un mejor desempeño en la remoción de arsénico, mientras que la cascara de cacao tuvo un mayor desempeño de remoción para el cobre, comportamiento que se relaciona con las características químicas de cada contaminante y los mecanismos de interacción por ambos materiales. En el caso del hierro disuelto, las mayores eficiencias se alcanzaron con las dosis bajas e intermedias en combinación de ambos materiales. Por otro lado, las concentraciones finales para el mercurio fueron muy bajas en todos los ensayos realizados. En cuanto a la turbidez la mejor opción fue la combinación de ambos materiales en dosis iguales.

Las combinaciones de magnetita y cascara de cacao mostraron un comportamiento favorable para la remoción de contaminantes y disminución de turbiedad en efluentes de relaves mineros. Asimismo, la incorporación de

separación magnética facilito la recuperación del material utilizado durante el proceso.

En conjunto, los resultados obtenidos sugieren que esta alternativa puede ser considerada para el tratamiento de efluentes procedentes de actividades mineras. Además, de ser una opción con bajo impacto ambiental, altamente eficaz y viable para procesos de remediación.

Referencias

- Aderonke, A. O., Abimbola, B. A., Ifeanyi, E., Omotayo, S. A., Oluwagbemiga, S. A., & Oladotun, W. M. (2014). Adsorption of heavy metal ions onto chitosan grafted cocoa husk chaff. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 8(10), 147–161. doi:10.5897/ajpac2014.0591
- Attiogbe, F., & Nkansah, A. (2017). The impact of mining on the water resources in Ghana: Newmont case study at Birim north district (New Abirem). *Energy and Environment Research*, 7(2), 27. doi:10.5539/eer.v7n2p27
- Carranza Reátegui, L. S., & Pinchi Del Aguila, M. G. (2023). Uso de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) para la remoción de aguas residuales domésticas. (Tesis de Licenciatura, Universidad Peruana Unión). Recuperado de <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/6386>
- Cedeño Zambrano, B. I., & Vásquez Vera, A. J. (2024). Eficiencia de bioadsorción de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la remoción de plomo y aluminio del agua residual de la lubricadora "La sin Par." (Tesis de Licenciatura, Escuela superior politécnica agropecuaria de manabí Manuel Félix López). Recuperado de <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/2353>
- Chen, H., Sharma, S. K., Sharma, P. R., Chi, K., Fung, E., Aubrecht, K., ... Hsiao, B. S. (2021). Nitro-oxidized car oxycellulose nanofibers from

Moringa plant: Effective bioadsorbent for mercury removal.
doi:10.21203/rs.3.rs-368266/v1

- Chen, X., Zheng, L., Sun, R., Liu, S., Li, C., Chen, Y., & Xu, Y. (2022). Mercury in sediment reflecting the intensive coal mining activities: Evidence from stable mercury isotopes and Bayesian mixing model analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 234. doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113392
- Coello-Cabezas, J., Verdezoto Carvajal, M., Mejía Cabezas, N., Sánchez-Moreno, H., Basantes, E., Estrella Semblantes, M., Gavilanez Alvarez, I., & Ormaza Hugo, R. (2024). Organic coagulant combined with magnetite nanoparticles for the treatment of mercury-contaminated waters. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. doi: 10.1016/j.cscee.2023.100579
- Daviran Huarcaya, J. J. (2021). Remoción de turbiedad y sólidos suspendidos totales con la utilización de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) como coagulante natural en las aguas del río Chillón. (Tesis de Licenciatura, Universidad de Ciencias y Humanidades). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12952/6368>
- El-Sayed, M. H., & Abdulhady, Y. A. M. (2015). Heavy metals removal by using magnetic iron oxide/TiO₂ nanocomposite for wastewater treatment in 10th of Ramadan city, Egypt. *Egyptian Journal of Desert Research*, 65(1), 81–99.
- Estupiñan Balaguera, S. L., & Bermúdez Cruz, E. F. (2019). Utilización de nanopartículas magnéticas en la modificación de coagulante para proceso de tratamiento de agua de lluvia. (Tesis de Licenciatura, Universidad Católica de Colombia). Recuperado de <https://hdl.handle.net/10983/24361>
- García Mesa, M. P., & González Reyes, J. A. (2021). Evaluación del desempeño de nanopartículas de magnetita en la remoción de cobre respecto al método convencional de precipitación alcalina para el tratamiento de aguas de producción del campo "B" a nivel de laboratorio con fines de reinyección. (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8634>
- Guillén Zevallos, M. O., Pérez Murillo, V., Quispe Carrizales, T., Talavera Nuñez, M. E., & Huaman Paredes, F. E. (2020). Tratamiento fisicoquímico de los efluentes del proceso de lavado de lana en una industria textil de Arequipa. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 86(4)

- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: Una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1) 253-262.
- Iconaru, S. L., Guégan, R., Popa, C. L., Motelica-Heino, M., Ciobanu, C. S., & Predoi, D. (2016). Magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles as adsorbents for As and Cu removal. *Applied Clay Science*, 134, 128–135. doi: 10.1016/j.clay.2016.08.019
- n, J., Tejada, C., Villabona, A., & Arrieta, A. (2017). Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao. *Revista ION*, 29(2), 111–122. doi:10.18273/revion.v29n2-2016009
- Liu, W. C., Yu, H. L., & Chung, C. E. (2011). Assessment of water quality in a subtropical alpine lake using multivariate statistical techniques and geostatistical mapping: a case study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(4), 1126–1140. doi:10.3390/ijerph8041126
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz García, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153. doi:10.18684/bsaa(14)145-153
- Loza Del Carpio, A. L., & Ccancapa Salcedo, Y. (2020). Mercurio en un arroyo altoandino con alto impacto por minería aurífera artesanal (La Rinconada, Puno, Perú). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(1), 33–44. doi:10.20937/RICA.2020.36.53317
- Marimon Bolivar, W. (2018). Ingeniería de Nanopartículas Magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. <https://doi.org/https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.39649>
- Monárrez-Cordero, B. E., Amézaga-Madrid, P., Leyva-Porras, C. C., Pizá-Ruiz, P., & Miki-Yoshida, M. (2016). Study of the adsorption of arsenic (III and V) by magnetite nanoparticles synthesized via AACVD. *Materials Research*, 19, 103–112. doi:10.1590/1980-5373-MR-2015-0667
- Naranjo Lucio, J. E. (2023). Producción de nanopartículas magnéticas a partir de desechos de la planta de cacao CCN-51 (*Theobroma Cacao* L) para el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio. (Tesis de Licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Recuperado de <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/22039>

- Osinergmin. (2016, agosto). Reporte de análisis económico sectorial Sector Minería: Mercado mundial, nacional, efectos derivados y visión de la minería (Año 5-Nº 6). Recuperado de http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/acerca_osinergmin/estudios_economicos/oficina-estudios-economicos
- Pabón SE, Villa RS, Benítez RB, & Corredor JA. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Pilicita Riofrío, V. A. (2020). Evaluación de la adsorción de especies de arsénico en medio acuoso usando nanopartículas de magnetita, mediante simulaciones AB-INITIO en el marco de DFT orientada a la creación de filtros de agua. (Tesis de [Licenciatura/Maestría], Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15017>
- Pinchi Del Águila, M. G., Carranza Reátegui, L. S., & Almestar Villegas, C. (2022). Eficiencia de la harina de cáscara de cacao (*Theobroma Cacao*) en la remoción de turbidez de aguas residuales domésticas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 88(4). doi:10.37761/rsqp. v88i4.407
- Rahbar, N., Jahangiri, A., Boumi, S., & Khodayar, M. J. (2014). Mercury removal from aqueous solutions with chitosan-coated magnetite nanoparticles optimized using the box-behnken design. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*, 9(2). doi:10.17795/jjnpp-15913
- Rajput, S., Pittman, C. U., & Mohan, D. (2016). Magnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb²⁺) and chromium (Cr⁶⁺) removal from water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 468, 334–346. doi: 10.1016/j.jcis.2015.12.008
- Ramirez Broncano, M. M. S. (2016). Bioadsorción de cadmio y manganeso con cáscara de naranja de las aguas de la Laguna Colquicocha. (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú). Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/2689>
- Rapeta, M. G., Maree, J. P., & Msagati, T. M. (2024). Removal of Iron (II) as Magnetite from Acid Mine Water. *Minerals*, 14(12), 1256. <https://doi.org/10.3390/min14121256>
- Rojas Silva, C. E. (2017). Síntesis y caracterización de nanopartículas de magnetita (Fe₃O₄) para un estudio en la remoción de metales pesados (Zn, Pb, Cr) presentes en el agua, como fortalecimiento a los procesos de

- tratamientos convencionales. (Tesis de [Licenciatura/Maestría], Universidad de Pamplona). Recuperado de: <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/4940>
- Rosales-Rimache, J. A., Malca, N. E., Alarcón, J. J., Chávez, M., & Gonzáles, M. A. (2013). Daño Genotóxico En Trabajadores De Minería Artesanal Expuesto Al Mercurio. Recuperado en 15 de diciembre de 2025, de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342013000400009&lng=es&tlng=es.
- Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2021). Mercury species in fish from a tropical river highly impacted by gold mining at the Colombian Pacific region. *Chemosphere*, 264. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128478
- Saldaña-Villanueva, K., Pérez-Vázquez, F. J., Ávila-García, I. P., Méndez-Rodríguez, K. B., Carrizalez-Yáñez, L., Gavilán-García, A., Vargas-Morales, J. M., Van-Brussel, E., & Diaz-Barriga, F. (2022). A preliminary study on health impacts of Mexican mercury mining workers in a context of precarious employment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 71. doi: 10.1016/j.jtemb.2022.126925
- Sánchez-Moreno, H. J., Cando Brito, V. M., Jaramillo Rivadeneira, K. S., Naranjo Silva, J. A., Zambrano, M., Calderón, H., & Añilema, L. (2024). Magnetita sintetizada con cloruro férrico y sulfato ferroso frente a nanopartículas de magnetita comercial en la eliminación de mercurio: estudio comparativo. <https://orcid.org/0000-0002-8661-2184>
- Soto Llanco, C. P. (2019). Filtros de cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) para la adsorción de plomo (II) en aguas de relave minero – 2019. (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12990/9010>
- Tapia Falcón, N. L., & Huanca Ccamercco, M. (2019). Remoción de arsénico en agua proveniente del río Tambo sector Quelgua con nanopartículas de óxido de hierro soportadas en zeolita. (Tesis de [Licenciatura/Maestría], Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa). Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10259>
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, A., & González-Delgado, Á. (2022). Adsorption study of continuous heavy metal ions (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+}) removal using cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husks. *Materials*, 15(19). doi:10.3390/ma15196937

Verdezoto Carbajal, M. A. (2023). Obtención de un coagulante natural con nanopartículas magnéticas para el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio. (Tesis de [Licenciatura/Maestría], Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21538>

Zapana Coila, Y. (2022). Remoción de los metales pesados mercurio y arsénico mediante la aplicación del biocarbón de waraqqo en las aguas residuales de la mina Rinconada - Puno. (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano). Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18831>

Anexos

Anexo 1

Sustento de sumisión a una revista de alto impacto.

Acuse de recibido coautor(es)

Desde Helena Rivas López <tyca.ojs@gmail.com>

Fecha Mar 16/12/2025 1:58

Para rosbeliaquispe <rosbeliaquispe@upeu.edu.pe>; yoselin.limahuaya <yoselin.limahuaya@upeu.edu.pe>

Estimado(a):

Hola Juan Eduardo Vigo Rivera a enviado el manuscrito, "Aplicación de nanopartículas de magnetita y cáscara de Cacao en aguas de relaves mineros auríferos en zonas del altiplano peruano" (ID. 4460) a *Tecnología y ciencias del agua*.

Usted forma parte de la lista de autores de este artículo.

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Helena Rivas López

Coordinadora Editorial de Tecnología y ciencias del agua

Anexo 2

Resolución que acredita la aprobación del perfil de investigación (Tesis) en modalidad de artículo científico, emitida por el consejo de facultad de ingeniería y arquitectura respectivo.



"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

RESOLUCIÓN N° 0868-2024/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Naña 19 de noviembre de 2024

VISTO:

El expediente de **Rosbelia Quispe Cotaluque**, identificado(a) con Código Universitario N° 201911764 y **Yoselin Gleni Limahuaya Chipana** identificado(a) con Código Universitario N° 201920287, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Rosbelia Quispe Cotaluque** y **Yoselin Gleni Limahuaya Chipana**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Aplicación de nanopartículas de magnetita y cáscara de Cacao en aguas de relaves mineros auríferos en zonas del altiplano peruano" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 19 de noviembre de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "**Aplicación de nanopartículas de magnetita y cáscara de Cacao en aguas de relaves mineros auríferos en zonas del altiplano peruano**" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a **Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **MSc. Rose Adeline Callata Chura** y **Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera**

, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA

cc:
-Intervenido
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo




Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADÉMICA

Anexo 3

Ensayos del efluente en test de jarras evaluando en diferentes dosis de adsorbente.



Anexo 4

Acondicionamiento y preservación de los efluentes tratados con magnetita y cascara de cacao previo antes del análisis.

