

NANOMATERIALES BASE MAGNETITA (Fe₃O₄) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Autor(es): Carlos Antonio Leyva Isaac¹, Enry Guerra Vera¹, Yereni Martínez Galán ²
Johan Felipe Aguirrezabal de la Rosa ²

1 Empresa Laboratorio Farmacéutico Oriente (LBF), Cuba. carliti011116@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3516-3374>
2 Refinería de Petróleo Hermanos Díaz, Santiago de Cuba, Cuba. <https://orcid.org/0009-0004-4501-047X>

INTRODUCCION (OBJETIVOS)

Las aguas residuales no tratadas se canalizan hacia los cuerpos de aguas naturales y ocasionan impactos sociales, económicos y ambientales negativos. Las principales fuentes son las industrias mineras, textiles, petroquímicas y farmacéuticas, que aportan colorantes, aditivos y compuestos orgánicos e inorgánicos que incrementan la toxicidad, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) y el carbono orgánico total (COT). En el contexto de la cuarta Revolución Industrial, la nanorremediación constituye una tecnología novedosa para la eliminación o estabilización de contaminantes. Las nanopartículas (NPs) de magnetita (Fe₃O₄) destacan por sus propiedades estructurales, morfológicas, ópticas, térmicas y magnéticas, y por su elevada relación superficie-volumen, que confieren una notable capacidad de adsorción e inmovilización de contaminantes. En Cuba, las colas del proceso Caron de producción de Ni+Co contienen aproximadamente 43% de hierro, como fases de maghemita (γ-Fe₂O₃) y magnetita (Fe₃O₄). Estas fases se forman durante el proceso de reducción y lixiviación del mineral, por lo que el residuo sólido constituye una fuente potencial de este material y motiva su revalorización. Esta investigación se realiza con el propósito de analizar los métodos de síntesis y las aplicaciones de nanomateriales base magnetita para el tratamiento de aguas residuales.

METODOLOGÍA

Se realizó una síntesis bibliográfica de estudios experimentales, revisiones y monografías, acerca de los métodos de síntesis, composición, propiedades químico-físicas, morfología y aplicaciones de nanomateriales base magnetita para el tratamiento de aguas residuales. Se identificaron seis vías principales de síntesis de NPs de magnetita: coprecipitación, hidrotérmica, solvotérmica, sol-gel, electroquímica y biosíntesis (síntesis verde con hongos, bacterias y extractos vegetales como mango, aloe vera, eucalipto, moringa y críticos). La coprecipitación se basa en la alcalinización de precursores Fe²⁺/Fe³⁺ (1:2) con NaOH: Fe²⁺+ Fe³⁺+ OH⁻ → Fe₃O₄ + 4H₂O. Los métodos hidrotérmico y solvotérmico operan a 130-250°C y 0,3-4 Mpa, mientras que el electroquímico emplea electro-oxidación del hierro con electrodos de sacrificio.

Método	Morfología	Características	Aplicación/Ref.
Biosíntesis	Esférica/globular, D:46,98 nm	Sm: 90 emu/g	Adsorción As (III)-Balakrishnam (2020)
Coprecipitación	Esférica, D:29,2 nm	As: 70,1 m ² /g	Adsorción azul de metileno-Sohair (2024)
Hidrotérmico	Varía con T (160-200°C	Adición ácido cítrico/piridina	Nanoesferas huecas-Rehman (2022)
Electroquímico	Esférica, D:10-30 nm	Sm: 60-70 emu/g	Fajarah (2012)/Manrique (2019)

RESULTADOS Y DISCUSION

1. Adsorción de metales pesados

Las NPs de magnetita presentan gran estabilidad química y alta relación superficie-volumen, con notable capacidad de adsorción de metales. Por vía verde se logró 95% de remoción de As(III) a 4 g/L y pH5,5. NPs de Fe₃O₄ funcionalizadas con ácido ascórbico mostraron alta dispersabilidad, propiedades superparamagnéticas y buena adsorción de As(III) y As(V). Con dosis de 25 g/kg e incubación de 45 días se removió: 44% As, 65% Cd, 60% Cu, 47% Fe, 40% Mn, 65% Pb y 62% Zn. NPs de magnetita mesoporosa removieron simultáneamente Pb, Cd, Cu y Ni del agua de río con eficiencias de 98%, 87%, 90% y 78%.

Adsorbente	Características	Adsorbato	Qe (mg/g)	Ref.
Fe ₃ O ₄ -Ácido ascórbico	D<10nm, Sm:40 emu/g	As(V)/As(III)	179,0/46,06	Feng(2012)
Fe ₃ O ₄	D:8nm, As:95m ² /g	Pb(II),Cu(II),Zn(II), Mn(II)	27,8/25,6/24,6/22,5	Giraldo(2013)
Fe ₃ O ₄ - caolinita	As:68,2m ² /g	Pb,Cu,Cr,Cd,Ni	65,2-106	Lasheen(2016)

3. Fotocatálisis

Las NPs de magnetita presentan banda prohibida pequeña, elevada estabilidad térmica y biocompatibilidad por lo que actúan como material precursor de fotocatálizadores híbridos para la remediación de aguas residuales, alcanzando degradaciones de hasta el 94-100% de colorantes como azul de metileno y rodamina B bajo luz UV o visible.

Fotocatálizador	Luz	Adsorbato	Degradación	Ref.
Fe ₃ O ₄ @ZnWO ₄ /CeVO ₄	Visible	MB	84	Amin(2020)
Fe ₃ O ₄ @ZnWO ₄	UV	RhB	100	Wang(2024)
Fe ₃ O ₄ @TiO ₂	Visible	Rojo ácido 73	94	Sun(2022)

2. Adsorción de materia orgánica

NPs y nanocompuestos base magnetita, óxidos metálicos, hidróxidos dobles laminares (LDH) y zeolitas se aplican en la remoción de pesticidas organofosforados, fármacos (fluoxetina, paroxetina, carbamazepina, diazepam) y colorantes. NPs sintetizadas por coprecipitación alcanzaron 95% de remoción de azul de metileno a pH 6,5 y dosis 50 mg/L. El antibiótico levofaxín (60 mg/L) se removió mediante estructura de nanocompuesto con eficiencias de 92,4-96,9%. Con nanoesferas huecas se removieron 92% de TNT (pH 6,5; 600 mg/L; 50 min). A partir de cítricos se logró 93,14% de remoción de tinte MB (pH 8,98; 998 mg/L; 44 min).

Adsorbente	As(m ² /g)	Adsorbato-Qe(mg/g)	Ref.
Fe ₃ O ₄ Nanopartículas	70,10	Azul de metileno-50	Sohair (2024)
Fe ₃ O ₄ Nano esferas huecas	66,06	TNT-70	Rehman (2022)
Fe ₃ O ₄ @TiO ₂ @Zeolita	33,46	Levofaxin-27	Denga (2025)

4. Coagulación-Floculación

La introducción de NPs de Fe₃O₄ a los coagulantes naturales favorece los procesos de coagulación-floculación: incrementan la velocidad de sedimentación y disminuyen la turbidez, el color aparente, la concentración de iones fosfato y la DQO en aguas residuales. Tal es el caso de la Fe₃O₄ funcionalizada con polímeros naturales como cáscaras de huevo, quitosano, almidón de arroz, cáscaras de plátano y moringa oleífera, que actuaron como agentes coagulantes-floculantes magnéticos bajo costo y origen renovable. En conjunto, los cuatro enfoques estudiados (adsorción de metales, adsorción de materia orgánica, fotocatálisis y coagulación-floculación asistida) demuestran que los nanomateriales base magnetita logran una mejora significativa en la calidad de los efluentes industriales, combinando alta eficiencia de remoción con la posibilidad de separación magnética del adsorbente tras el tratamiento.

CONCLUSIONES

- Las nanopartículas de magnetita se sintetizan principalmente por biosíntesis, coprecipitación química y vía electroquímica, métodos que permiten controlar tamaño, morfología y propiedades magnéticas.
- Estos nanomateriales se emplean eficazmente en la adsorción de metales pesados y materia orgánica, en procesos de fotocatálisis y combinados con coagulantes naturales, logrando una mejora significativa en la calidad de efluentes industriales.
- Las colas del proceso Caron generadas por las industrias del níquel en Cuba (≈43% de hierro como maghemita y magnetita) constituyen una fuente potencial de este material para su revalorización.
- Los avances y aplicaciones de los nanomateriales base magnetita presentan a este material como una alternativa técnicamente viable y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales industriales.