

## Nanomateriales funcionalizados y sostenibilidad hídrica: reflexiones sobre los avances en la recuperación de aguas contaminadas

*Functionalized nanomaterials and water sustainability: reflections on advances in contaminated water recovery*

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.c.03.33>

Hipólito Carbajal Morán

 Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú

✉ [hipolito.carbajal@unh.edu.pe](mailto:hipolito.carbajal@unh.edu.pe)

 <https://orcid.org/0000-0002-1661-5363>

### Resumen

La crisis hídrica global, agravada por la contaminación industrial, el cambio climático y las brechas de infraestructura, demanda soluciones tecnológicas capaces de garantizar la calidad y disponibilidad del agua bajo principios de sostenibilidad ambiental. En este contexto, los nanomateriales funcionalizados emergen como una herramienta de alto potencial para la recuperación de aguas contaminadas, gracias a su capacidad de adsorción, fotocátalisis y detección selectiva de contaminantes persistentes. Este ensayo analiza críticamente los avances recientes en el desarrollo y aplicación de nanomateriales metálicos y semiconductores funcionalizados, destacando su eficacia comprobada a escala experimental y los desafíos que enfrenta su implementación en contextos de baja capacidad tecnológica, como América Latina. Se examinan las limitaciones estructurales vinculadas a los costos de síntesis, la ausencia de marcos regulatorios y la necesidad de transitar hacia modelos de síntesis verde, que empleen agentes biogénicos y minimicen la huella ecológica. Desde una perspectiva ética y ecológica, se plantea que la sostenibilidad de la nanotecnología no debe entenderse solo en términos de eficiencia, sino como un proceso orientado a la equidad hídrica y justicia ambiental, integrando la evaluación del ciclo de vida y la gobernanza responsable. Finalmente, el ensayo propone que la consolidación de una nanotecnología ambiental verde y segura requiere una mayor inversión en investigación interdisciplinaria, políticas públicas sostenibles y marcos regulatorios claros que articulen innovación científica, seguridad ecológica y bienestar social. Los nanomateriales funcionalizados se perfilan, así, como catalizadores de una transición hacia una gestión hídrica más resiliente, ética y equitativa.

**Palabras clave:** justicia ambiental, nanomateriales funcionalizados, nanotecnología ambiental, sostenibilidad hídrica, síntesis verde.



## **Abstract**

The global water crisis, exacerbated by industrial pollution, climate change, and infrastructure gaps, demands technological solutions capable of guaranteeing water quality and availability under principles of environmental sustainability. In this context, functionalized nanomaterials emerge as a tool with high potential for the recovery of contaminated water, thanks to their capacity for adsorption, photocatalysis, and selective detection of persistent pollutants. This essay critically analyses recent advances in the development and application of functionalized metallic and semiconductor nanomaterials, highlighting their proven effectiveness on an experimental scale and the challenges facing their implementation in contexts with low technological capacity, such as Latin America. It examines the structural limitations linked to synthesis costs, the absence of regulatory frameworks, and the need to transition to green synthesis models that use biogenic agents and minimize the ecological footprint. From an ethical and ecological perspective, it is argued that the sustainability of nanotechnology should not be understood solely in terms of efficiency, but as a process oriented toward water equity and environmental justice, integrating life cycle assessment and responsible governance. Finally, the essay proposes that the consolidation of green and safe environmental nanotechnology requires greater investment in interdisciplinary research, sustainable public policies, and clear regulatory frameworks that articulate scientific innovation, ecological safety, and social well-being. Functionalized nanomaterials are thus emerging as catalysts for a transition toward more resilient, ethical, and equitable water management.

**Keywords:** environmental justice, environmental nanotechnology, functionalized nanomaterials, green synthesis, water sustainability.

## **INTRODUCCIÓN**

El agua es un recurso esencial para la sostenibilidad de la vida, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico; sin embargo, su disponibilidad y calidad están siendo severamente comprometidas en amplias regiones del planeta. En América Latina, y particularmente en el Perú, la situación adquiere un carácter crítico debido a la confluencia de factores naturales, socioeconómicos y antrópicos que intensifican la crisis hídrica estructural (Dos Santos et al., 2023). Aunque el país posee alrededor del 71 % de los glaciares tropicales del mundo y una notable riqueza hídrica superficial, esta se encuentra distribuida de manera desigual: mientras la Amazonía concentra la mayor parte de los recursos, las regiones costeras y altoandinas padecen escasez significativa (Gala & Gutiérrez, 2024).

A ello se suma la contaminación derivada de actividades extractivas y mineras, una de las principales causas del deterioro de las fuentes de agua. En la sierra central y sur, el drenaje ácido de mina, cargado de metales pesados como arsénico, plomo y cadmio, contamina ríos, suelos y acuíferos subterráneos, generando bioacumulación y afectando directamente la salud pública, la agricultura y los ecosistemas acuáticos (Geracitano et al., 2021). Esta problemática se ve agravada por la deficiente infraestructura de saneamiento,

la sobreexplotación de fuentes hídricas y los impactos del cambio climático, que reducen la capacidad de regeneración natural de los cuerpos de agua y acentúan la vulnerabilidad de comunidades rurales (Glavič, 2022).

Frente a este panorama, la búsqueda de soluciones tecnológicas sostenibles se ha convertido en una prioridad ambiental y social. En este contexto, la nanotecnología ambiental emerge como un campo interdisciplinario de gran potencial, al permitir el diseño de materiales con propiedades únicas a escala nanométrica para la adsorción, fotocatalisis y detección de contaminantes persistentes (Ajith et al., 2021). Entre estos, los nanomateriales funcionalizados se destacan por su capacidad de eliminar eficientemente metales pesados, colorantes, hidrocarburos y compuestos farmacéuticos, superando los límites de los métodos convencionales de tratamiento (Mehta et al., 2024). Su versatilidad y capacidad de reutilización los posicionan como herramientas estratégicas para avanzar hacia modelos de gestión hídrica resiliente y alineados con los principios de la química verde (Mughal et al., 2021).

Bajo estas consideraciones, con el objetivo de proporcionar un análisis integral, estructurado y basado en evidencia científica, el estudio de los avances en el uso de nanomateriales metálicos y semiconductores funcionalizados en la recuperación de aguas contaminadas desarrollado por Carbajal Morán et al. (2025) reunió información relevante procedente de investigaciones recientes publicadas en bases de datos científicas de alto impacto, como Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Se revisaron estudios que abordaron variables relacionadas con el tipo de nanomaterial empleado, su eficiencia en la eliminación de contaminantes, la capacidad de reutilización y la estabilidad estructural de los materiales funcionalizados. Este análisis permitió establecer una base empírica sólida para comprender el potencial y las limitaciones de la nanotecnología aplicada a la sostenibilidad hídrica.

No obstante, la evidencia también revela una brecha significativa entre la eficiencia demostrada en laboratorio y la viabilidad de implementación a gran escala en contextos como el peruano, donde los altos costos de síntesis, la falta de infraestructura tecnológica y la escasez de marcos regulatorios específicos dificultan su adopción industrial (Chávez-Hernández et al., 2024). Además, la transición hacia una síntesis verde que utilice agentes biológicos y reduzca la toxicidad de los procesos sigue siendo un desafío científico y económico (Sharma et al., 2022).

En este contexto, se sostiene la tesis: a pesar de la probada eficiencia global de los nanomateriales funcionalizados en la remediación hídrica, su implementación a escala industrial en el Perú se encuentra restringida por desafíos estructurales asociados a la optimización de los ciclos de reutilización, la sostenibilidad de los métodos de síntesis verde y los altos costos de producción, lo que impide su integración efectiva en las políticas públicas de gestión hídrica sostenible.

Esta dualidad entre innovación tecnológica y limitación estructural plantea una pregunta central que orienta este ensayo: ¿puede la nanotecnología consolidarse como una alternativa viable, segura y equitativa para enfrentar la

crisis hídrica nacional, o permanecerá como una promesa científica confinada al laboratorio por sus restricciones económicas, ecológicas y regulatorias?

## **DESARROLLO**

### **Avances tecnológicos en nanomateriales funcionalizados**

Durante la última década, los nanomateriales funcionalizados se consideran como una de las tecnologías más prometedoras para la recuperación de aguas contaminadas. Los avances científicos han permitido el desarrollo de óxidos metálicos y semiconductores con propiedades optimizadas para la adsorción, fotocátalisis y estabilidad estructural. Entre los materiales más destacados se encuentran el óxido de cobre ( $\text{CuO}$ ), la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y el espínelo de manganeso-cobalto ( $\text{MnCo}_2\text{O}_4$ ), cuyas propiedades fisicoquímicas han sido ampliamente exploradas por su eficiencia en la captura y degradación de contaminantes (Avila et al., 2008; Ghamarpoor et al., 2024; Mehta et al., 2024)

Estos materiales presentan características específicas y diferenciadas: el  $\text{CuO}$  muestra una alta capacidad de adsorción de metales pesados y colorantes; el  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  destaca por su magnetismo, que permite su fácil recuperación y reutilización mediante separación magnética; y el  $\text{MnCo}_2\text{O}_4$ , como semiconductor, combina una excelente respuesta fotocatalítica con estabilidad química bajo irradiación solar (Nsengiyumva et al., 2018; Zhao et al., 2020). Tales avances representan evidencia del progreso tecnológico alcanzado en la ingeniería de materiales a escala nanométrica, aunque plantean interrogantes sobre su viabilidad en contextos de bajos recursos, donde los costos de producción, la infraestructura técnica y la disponibilidad de equipos especializados siguen siendo limitantes (Ajith et al., 2021).

El desarrollo de nanomateriales avanzados no solo refleja la madurez científica alcanzada por la nanotecnología ambiental, sino que también evidencia la brecha existente entre la eficiencia demostrada en laboratorio y la capacidad de transferencia tecnológica hacia entornos industriales o rurales. Este contraste plantea una interrogante central: ¿cómo trasladar la innovación nanométrica a escenarios donde la sostenibilidad económica y la equidad tecnológica son tan importantes como la eficiencia química?

### **Sostenibilidad y reutilización**

La sostenibilidad en el uso de nanomateriales funcionalizados no se limita a su eficiencia, sino a su capacidad de ser reutilizados y regenerados sin pérdida significativa de rendimiento. La magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y sus derivados funcionalizados con sílice o aminoácidos han mostrado ciclos de reutilización prolongados, lo que refuerza su potencial en procesos de tratamiento continuo (Kazemi et al., 2019; Mehmood et al., 2021). Esta característica los convierte en candidatos idóneos para integrar un modelo circular del agua, en el que los materiales no sean desechables, sino que formen parte de un sistema regenerativo y autosostenible.

No obstante, la durabilidad de los nanomateriales se ve afectada por factores como la aglomeración, la pérdida de superficie activa o la lixiviación de iones metálicos. Diversos estudios proponen estrategias de recubrimiento y re-

funcionalización, que permiten extender la vida útil del material sin comprometer su capacidad de adsorción o fotocátalisis (Rezaei et al., 2021). Este enfoque coincide con los objetivos de la química verde, que busca minimizar el impacto ambiental mediante procesos limpios y energéticamente eficientes (Glavič, 2022).

El paradigma emergente de la síntesis verde representa un intento de reconciliar la eficiencia tecnológica con la ética ecológica. A través de métodos biosintéticos que emplean extractos vegetales, microorganismos o biopolímeros naturales como agentes reductores y estabilizantes, se reduce la dependencia de solventes tóxicos y se promueve una producción más sostenible (Mughal et al., 2021; Sharma et al., 2022). Este cambio de paradigma redefine la forma de producir nanomateriales y reconfigura el marco ético de la innovación científica, estableciendo que la sostenibilidad no debe ser una consecuencia del desarrollo tecnológico, sino su condición fundamental.

### **Desafíos éticos y ecológicos en el uso de nanomateriales**

El debate sobre los riesgos ambientales y éticos asociados al uso de nanomateriales se ha intensificado en los últimos años. Si bien su eficiencia en la eliminación de contaminantes está ampliamente demostrada, la toxicidad potencial de las nanopartículas libres en el ambiente y sus efectos sobre los organismos acuáticos y el ser humano son motivo de creciente preocupación (Kumar, 2025). Nanopartículas como las de plata (AgNPs) o dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), por ejemplo, pueden inducir estrés oxidativo, alterar membranas celulares y bioacumularse en organismos acuáticos (Gambardella & Pinsino, 2022).

Además, los materiales avanzados requieren altos costos energéticos y químicos para su síntesis y regeneración, lo que puede contradecir los principios de sostenibilidad si no se implementan procesos verdes o circulares (Mpongwana & Rathilal, 2022). Esta contradicción plantea un dilema ético: ¿hasta qué punto es aceptable introducir nuevas tecnologías de remediación si su huella ecológica reproduce los mismos patrones de contaminación que buscan mitigar?

Ante ello, diversos autores proponen una nanotecnología responsable, basada en el principio de precaución y la evaluación del ciclo de vida completo de los materiales (Cummins et al., 2021). Este enfoque implica integrar la evaluación toxicológica, el impacto socioeconómico y la transparencia regulatoria desde las primeras etapas del diseño. De este modo, la nanotecnología ambiental puede evolucionar hacia una ciencia verdaderamente sustentable, guiada tanto por la eficiencia como por la responsabilidad ecológica.

### **Perspectiva latinoamericana: brechas tecnológicas y regulatorias**

En América Latina, la aplicación de la nanotecnología al tratamiento de aguas se encuentra aún en una fase incipiente y desigual. Si bien países como Brasil, México y Chile han desarrollado líneas de investigación consolidadas en nanomateriales aplicados al medio ambiente, el resto de la región incluido el Perú enfrenta limitaciones estructurales derivadas de la falta de inversión en infraestructura científica, marcos regulatorios específicos y políticas de



innovación sostenida (Dos Santos et al., 2023; Gala & Gutiérrez, 2024; Geracitano et al., 2021).

La ausencia de normativas claras sobre la producción, manipulación y disposición final de nanomateriales genera incertidumbre y frena su transferencia tecnológica. Además, la dependencia de reactivos importados y la limitada capacidad de escalamiento industrial impiden consolidar un ecosistema regional de producción sostenible. Esta brecha tecnológica se amplía cuando se comparan los contextos latinoamericanos con los estándares de regulación establecidos por la Unión Europea o Estados Unidos, donde los marcos de nanoética y nanoseguridad forman parte integral de las políticas ambientales (Chávez-Hernández et al., 2024; Doak et al., 2022).

No obstante, la región posee un potencial singular: su diversidad biológica y su experiencia en aprovechamiento de recursos naturales la posicionan como un terreno fértil para la síntesis verde y el desarrollo de nanomateriales biogénicos. Iniciativas recientes en Colombia, Argentina y Perú exploran el uso de extractos vegetales y biomasa residual en la producción de nanopartículas funcionalizadas con bajo impacto ambiental (Alarcón-Aravena et al., 2022; Román Ferreyra & Monteza, 2024). Esta orientación podría convertir a América Latina en un referente de innovación ecológica, siempre que se consoliden políticas públicas que articulen la investigación científica, la educación tecnológica y la gestión ambiental sostenible.

### **Discusión: el paradigma de la síntesis verde como reconciliación entre eficiencia y ética ecológica**

El paradigma de la síntesis verde ha emergido como un enfoque transformador dentro de la nanotecnología contemporánea, al proponer una alternativa viable para reducir el impacto ambiental derivado de la producción tradicional de nanomateriales. Este modelo se fundamenta en los principios de la química verde (Glavič, 2022), que abogan por el diseño de procesos químicos más seguros, sostenibles y económicamente eficientes. En el contexto de los nanomateriales funcionalizados, la síntesis verde busca sustituir los agentes reductores y estabilizantes tóxicos como el borohidruro de sodio o los solventes orgánicos por compuestos naturales provenientes de extractos vegetales, microorganismos o biopolímeros (Vishnu & Dhandapani, 2020). Esta sustitución no solo disminuye los residuos peligrosos, sino que alinea la innovación científica con los principios de ética ecológica, al reconocer que la eficiencia tecnológica no puede sostenerse a costa del deterioro ambiental.

Por otro lado, los avances en nanomateriales funcionalizados confirman su potencial para enfrentar la crisis hídrica global mediante procesos de adsorción y fotocatalisis altamente eficientes. No obstante, su transferencia a contextos reales sigue limitada por factores económicos, técnicos y regulatorios, especialmente en regiones con escasa infraestructura científica (Ajith et al., 2021; Ghamarpoor et al., 2024). Este escenario plantea la necesidad de un nuevo paradigma que equilibre la eficiencia tecnológica con la responsabilidad ambiental.

En este marco, la síntesis verde es una alternativa clave para reducir el impacto ecológico de la producción de nanomateriales, sustituyendo reactivos tóxicos por agentes naturales y promoviendo procesos energéticamente sostenibles (Glavič, 2022; Mughal et al., 2021). Este enfoque no solo minimiza los residuos y la huella ambiental, sino que también redefine la innovación como un proceso ético-tecnológico, donde la eficiencia se mide en términos de compatibilidad ecológica y justicia ambiental.

Sin embargo, persisten desafíos científicos y estructurales. La síntesis verde requiere optimizar la estabilidad y reproducibilidad de las nanopartículas y evaluar su comportamiento ecotoxicológico para evitar nuevos impactos sobre los ecosistemas acuáticos (Gambardella & Pinsino, 2022; Kumar, 2025). La adopción de una nanotecnología responsable, basada en la evaluación del ciclo de vida y la transparencia regulatoria, resulta esencial para garantizar una transición coherente hacia la sostenibilidad.

En América Latina, las brechas tecnológicas y normativas obstaculizan la consolidación de una nanotecnología ambiental sostenible; sin embargo, la riqueza biológica regional ofrece un escenario propicio para el desarrollo de síntesis verdes basadas en recursos locales. De este modo, la síntesis verde no solo representa un avance técnico, sino un cambio de paradigma que reconcilia la innovación con la ética ecológica, proyectando a la nanotecnología como un eje transformador hacia una economía del agua sustentable y equitativa.

## **CONCLUSIÓN**

La nanotecnología, y en particular los nanomateriales funcionalizados, trascienden su función instrumental para consolidarse como un eje estratégico en la búsqueda de justicia y equidad hídrica. Su capacidad para transformar la calidad del agua y restaurar ecosistemas degradados los convierte en una herramienta de innovación con profundo impacto social y ambiental. Más allá de su eficiencia científica, representan una oportunidad para democratizar el acceso a recursos vitales, especialmente en regiones donde las desigualdades estructurales y las brechas tecnológicas limitan el derecho al agua segura.

No obstante, su implementación requiere una visión integral y ética, donde la eficiencia técnica se articule con la sostenibilidad ecológica. La transición hacia una nanotecnología verde, sustentada en principios de síntesis limpia, evaluación del ciclo de vida y seguridad ambiental, constituye una condición esencial para evitar que las soluciones tecnológicas reproduzcan las mismas lógicas extractivas y contaminantes que buscan resolver. En este marco, el avance científico debe estar acompañado de políticas públicas e inversión sostenida en investigación contextualizada, capaces de generar conocimiento propio y tecnologías adaptadas a las realidades locales. Solo así la nanotecnología podrá consolidarse como un instrumento de transformación ambiental y social, orientado hacia una gestión hídrica equitativa, resiliente y sostenible.

Asimismo, el desarrollo de marcos regulatorios específicos y coherentes con políticas públicas sostenibles resulta crucial para garantizar la transparencia, la trazabilidad y la gobernanza ambiental de estas tecnologías. Solo así será

posible integrar la nanotecnología en una agenda de sostenibilidad hídrica que no privilegie la rentabilidad inmediata, sino el bienestar colectivo, la resiliencia ecológica y el derecho universal al agua limpia.

En definitiva, los nanomateriales funcionalizados se consolidan como una alternativa estratégica para reconfigurar la relación entre ciencia, sociedad y naturaleza. Su verdadero valor trasciende la eficiencia técnica y radica en su potencial para actuar como catalizadores de una transformación socioambiental profunda, orientada hacia un modelo de desarrollo donde la equidad hídrica y la justicia ambiental se sitúen en el núcleo de las políticas científicas y tecnológicas.

#### **Rol de contribución**

**Hipólito Carbajal:** Conceptualización, análisis formal, investigación, escritura–borrador original, escritura–revisión y edición, visualización, supervisión, administración del proyecto.

#### **Fuentes de financiamiento / Funding:**

El autor declara que este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de la Universidad Nacional de Huancavelica a través del Fondo de Desarrollo Socioeconómico de Camisea (FOCAM).

#### **REFERENCIAS**

- Ajith, M. P., Aswathi, M., Priyadarshini, E., & Rajamani, P. (2021). Recent innovations of nanotechnology in water treatment: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 342, 126000. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126000>
- Alarcón-Aravena, G., Carmona, E. R., Recio-Sánchez, G., Ruiz, A. G., Domenech, J., Marcos, R., & Garrido, K. (2022). Green Synthesis of Magnetite Nanoparticles Using Leaf Plant Extracts of South American Endemic *Cryptocarya alba*. *Current Nanoscience*, 18(5), 646–654. <https://doi.org/10.2174/1573413718666220221123725>
- Avila, H., Moreno, K. J., Moggio, I., Arias, E., Castruita, G., Vazquez, R. A., Medellín, D. I., & Ziolo, R. F. (2008). Nanopartículas de plata y oro funcionalizadas in situ con el polímero conjugado fluorescente pPET3OC12-sqS. Síntesis, propiedades morfológicas, ópticas y eléctricas. *Superficies y vacío*, 21(1), 20–25.
- Carbajal Morán, H., Marquez Camarena, J. F., Galván Maldonado, C. A., & Zárate Quiñones, R. H. (2025). Advances in wastewater remediation using functionalized metallic and semiconductor nanomaterials: A systematic review. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(2), 205–219. <https://doi.org/10.12912/27197050/197170>
- Chávez-Hernández, J. A., Velarde-Salcedo, A. J., Navarro-Tovar, G., & Gonzalez, C. (2024). Safe nanomaterials: from their use, application, and disposal to regulations. *Nanoscale Advances*, 6(6), 1583–1610. <https://doi.org/10.1039/D3NA01097J>
- Cummings, C. L., Kuzma, J., Kokotovich, A., Glas, D., & Grieger, K. (2021). Barriers to responsible innovation of nanotechnology applications in food and agriculture: A study of US experts and developers. *NanoImpact*, 23, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100326>
- Doak, S. H., Clift, M. J. D., Costa, A., Delmaar, C., Gosens, I., Halappanavar, S., Kelly, S., Peijnenburg, W. J. G. M., Rothen-Rutishauser, B., Schins,



- R. P. F., Stone, V., Tran, L., Vijver, M. G., Vogel, U., Wohlleben, W., & Cassee, F. R. (2022). The Road to Achieving the European Commission's Chemicals Strategy for Nanomaterial Sustainability—A PATROLS Perspective on New Approach Methodologies. *Small*, 18(17), 2200231. <https://doi.org/10.1002/sml.202200231>
- Dos Santos, A. J., Barazorda-Ccahuana, H. L., Caballero-Manrique, G., Chérémond, Y., Espinoza-Montero, P. J., González-Rodríguez, J. R., Jáuregui-Haza, U. J., Lanza, M. R. V, Nájera, A., Oporto, C., Pérez Parada, A., Pérez, T., Quezada, V. D., Rojas, V., Sosa, V., Thiam, A., Torres-Palma, R. A., Vargas, R., & Garcia-Segura, S. (2023). Accelerating innovative water treatment in Latin America. *Nature Sustainability*, 6(4), 349–351. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01042-z>
- Gala, V., & Gutiérrez, C. (2024). *Nanotechnology under construction: A review of its application in Peru*. In T. Kang & Y. Lee (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Civil Engineering and Architecture* (Vol. 1, pp. 292–311). Springer Nature Singapore.
- Gambardella, C., & Pinsino, A. (2022). Nanomaterial Ecotoxicology in the Terrestrial and Aquatic Environment: A Systematic Review. En *Toxics* (Vol. 10, Número 7). <https://doi.org/10.3390/toxics10070393>
- Geracitano, L. A., Fagan, S. B., & Monserrat, J. M. (2021). Analysis of global and Latin-American trends in nanotoxicology with a focus on carbon nanomaterials: a scientometric approach. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 96(8), 2141–2151. <https://doi.org/10.1002/jctb.6729>
- Ghamarpoor, R., Fallah, A., & Jamshidi, M. (2024). A Review of Synthesis Methods, Modifications, and Mechanisms of ZnO/TiO<sub>2</sub>-Based Photocatalysts for Photodegradation of Contaminants. *ACS Omega*, 9(24), 25457–25492. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08717>
- Glavič, P. (2022). Updated Principles of Sustainable Engineering. En *Processes* (Vol. 10, Número 5). <https://doi.org/10.3390/pr10050870>
- Kazemi, A., Bahramifar, N., Heydari, A., & Olsen, S. I. (2019). Synthesis and sustainable assessment of thiol-functionalization of magnetic graphene oxide and superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> for Hg(II) removal from aqueous solution and petrochemical wastewater. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 95, 78–93. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.10.002>
- Kumar, A. (2025). *Engineered Nanomaterials and Associated Threats in the Environment Risk Assessment Strategies BT - Biotechnological Interventions in the Removal of Emerging Pollutants* (S. Dey & S. Bhattacharya (eds.); pp. 515–537). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-9922-0\\_24](https://doi.org/10.1007/978-981-97-9922-0_24)
- Mehmood, A., Khan, F. S. A., Mubarak, N. M., Tan, Y. H., Karri, R. R., Khalid, M., Walvekar, R., Abdullah, E. C., Nizamuddin, S., & Mazari, S. A. (2021). Magnetic nanocomposites for sustainable water purification—a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(16), 19563–19588. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12589-3>
- Mehta, P., Chelike, D. K., & Rathore, R. K. (2024). Adsorption-Based Approaches for Exploring Nanoparticle Effectiveness in Wastewater Treatment. *ChemistrySelect*, 9(25), e202400959. <https://doi.org/10.1002/slct.202400959>

- Mpongwana, N., & Rathilal, S. (2022). A Review of the Techno-Economic Feasibility of Nanoparticle Application for Wastewater Treatment. *Water*, 14(10), 1550. <https://doi.org/10.3390/w14101550>
- Mughal, B., Zaidi, S. Z., Zhang, X., & Hassan, S. U. (2021). Biogenic Nanoparticles: Synthesis, Characterisation and Applications. *Applied Sciences* 11(6). <https://doi.org/10.3390/app11062598>
- Nsengiyumva, W., Chen, S. G., Hu, L., & Chen, X. (2018). Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 250–279. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.06.085>
- Rezaei, H., Shahbazi, K., & Behbahani, M. (2021). Application of Amine Modified Magnetic Nanoparticles as an Efficient and Reusable Nanofluid for Removal of Ba<sup>2+</sup> in High Saline Waters. *Silicon*, 13(12), 4443–4451. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00743-4>
- Román Ferreyra, J. F., & Monteza, J. (2024). Metabolómica de *polylepis racemosa* y utilización del extrato acuoso de su tallo en la síntesis de nanopartículas de plata. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 90(3), 158–172.
- Sharma, V. D., Vishal, V., Chandan, G., Bhatia, A., Chakrabarti, S., & Bera, M. K. (2022). Green, sustainable, and economical synthesis of fluorescent nitrogen-doped carbon quantum dots for applications in optical displays and light-emitting diodes. *Materials Today Sustainability*, 19, 100184. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100184>
- Vishnu, D., & Dhandapani, B. (2020). Integration of *cynodon dactylon* and *muraya koenigii* plant extracts in amino-functionalised silica-coated magnetic nanoparticle as an effective sorbent for the removal of chromium(VI) metal pollutants. *IET Nanobiotechnology*, 14(6), 449–456. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2019.0313>
- Zhao, X., Zhao, H., Yan, L., Li, N., Shi, J., & Jiang, C. (2020). Recent Developments in Detection Using Noble Metal Nanoparticles. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 50(2), 97–110. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1576496>