

Green Nanotechnology: Efficient Solutions for a Sustainable Future

NANOTECNOLOGÍA VERDE: SOLUCIONES EFICIENTES PARA UN FUTURO SOSTENIBLE

Ileana S. Cabrera-Blanco^{1*}, Jorge L. Cholula-Díaz^{1**}

La nanotecnología verde surge como respuesta a la necesidad de producir nanomateriales mediante procesos más sostenibles, al reducir el uso de reactivos peligrosos y la generación de residuos, así como al disminuir el impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida. En este artículo se ejemplifican las aplicaciones de la nanotecnología verde en diversas áreas: biomédica, energética, agrícola y de remediación ambiental. Estas aplicaciones evidencian el potencial de la nanotecnología verde para contribuir al desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles que, aunque aún presentan retos asociados a la nanoescala, particularmente su potencial toxicidad, su escalamiento y sus costos de producción, nos acercan a un futuro más próspero y amigable con el medio ambiente.

Palabras clave: nanotecnología verde, nanomateriales, sustentabilidad.

Green nanotechnology has emerged in response to the need to develop advanced, more efficient materials through safer, sustainable processes, thereby reducing the use of hazardous reagents, waste generation, and environmental impact throughout their life cycle. This article illustrates its applications in diverse fields, including biomedicine, energy, agriculture, and environmental remediation. These applications highlight the potential of nanotechnology to contribute to the development of more efficient and sustainable solutions, which, although they still face challenges related to toxicity assessment, scale-up, and production costs, bring us closer to a more prosperous and environmentally friendly future.

Keywords: green nanotechnology, nanomaterials, sustainability.

Recibido: 2 de junio de 2026. Aceptado en forma final: 1 de septiembre de 2026

Cómo citar este artículo: Cabrera-Blanco, Ileana S. y Cholula-Díaz, Jorge L: "Nanotecnología Verde: Soluciones Eficientes para un Futuro Sostenible". *Revista de Química*, 2026, 40 (2), 2-9. DOI: <https://doi.org/10.18800/quimica.202602.001>

¹ Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Nuevo León, México.

*  <https://orcid.org/0009-0002-6747-1766>

**  <http://orcid.org/0000-0002-4457-1572> (jorgeluis.cholula@tec.mx)



INTRODUCCIÓN

En la vida diaria buscamos soluciones que funcionen mejor y, al mismo tiempo, cuiden los recursos y el medio ambiente. Ante la amenaza que representan el avance del calentamiento global y la contaminación de los cuerpos de agua, el desarrollo de tecnologías eficientes y sostenibles se ha convertido en una necesidad para avanzar sin comprometer el futuro.

En varios casos, las soluciones más prometedoras se encuentran en tecnologías tan pequeñas que no se ven a simple vista, pero que generan un gran impacto. A escala nanométrica, los materiales modifican sus propiedades ópticas y electrónicas, e incluso su biocompatibilidad y toxicidad.^{1,2} Este es el principio de la nanotecnología, una disciplina científica y tecnológica que estudia y manipula materiales a escala nanométrica, es decir, una millonésima parte de un milímetro. Sin embargo, aunque la nanotecnología ofrece alternativas eficientes, no siempre van de la mano con la sostenibilidad, ya que la fabricación de nanomateriales suele implicar el uso de reactivos peligrosos, como el borohidruro de sodio (NaBH_4), hidrazina (N_2H_4), bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB), etc., y un alto consumo de energía.² Es aquí donde el enfoque de la nanotecnología verde desempeña un papel crucial, ya que permite producir nanomateriales eficientes,

reducir el uso de reactivos peligrosos y evitar la generación de residuos contaminantes³⁻⁷.

La nanotecnología verde se origina a partir de los 12 principios de la química verde establecidos por Anastas y Warner,⁸ siendo probablemente James E. Hutchison en "*Greener Nanoscience: A Proactive Approach to Advancing Applications and Reducing Implications of Nanotechnology*", quien más notoriedad ha tenido promoviendo la aplicación de estos principios de química verde en el desarrollo de productos nanotecnológicos, proponiendo consideraciones y alternativas para algunos procesos que permiten producir nanomateriales con alta eficiencia y bajo o nulo porcentaje de reactivos y residuos peligrosos.⁹ En la **Figura 1**, se presentan las principales áreas y aplicaciones en las que la nanotecnología verde ha contribuido al desarrollo de soluciones más sostenibles.

SÍNTESIS DE NANOMATERIALES MEDIANTE QUÍMICA VERDE

La síntesis de nanomateriales mediante química verde es una de las bases de la nanotecnología verde, ya que busca sintetizar materiales funcionales mediante



Figura 1. Relación entre los principios de la química verde y los criterios de diseño de la nanotecnología verde. Basado en Hutchison, J. E. *Greener Nanoscience: A Proactive Approach to Advancing Applications and Reducing Implications of Nanotechnology*. *ACS Nano* **2008**, 2 (3), 395–402.

metodologías más seguras, eficientes y sostenibles. En estas metodologías destaca el uso de extractos vegetales, microorganismos y biomoléculas naturales como agentes reductores y estabilizantes, aprovechando compuestos como azúcares y proteínas, entre otras sustancias, para favorecer la formación de nanomateriales.^{10–12}

Una de las metodologías más estudiadas consiste en emplear extractos de plantas para reducir iones metálicos y producir nanopartículas, pues estos contienen compuestos capaces de reducir dichos iones y de estabilizar las nanoestructuras. Actualmente, se ha reportado la síntesis verde de nanopartículas metálicas, como plata (Ag), oro (Au), paladio (Pd) y platino (Pt), así como de algunos óxidos metálicos, a partir de extractos de hojas, flores y frutos, entre otros.^{10–13} De la misma manera, se utilizan bacterias, hongos y levaduras para la formación de nanopartículas mediante biomoléculas de origen natural.^{14–16}

Además de reducir el uso de reactivos peligrosos, la síntesis verde busca optimizar el consumo de materias primas, mejorar la eficiencia del proceso y minimizar la generación de residuos. Sin embargo, aunque estas rutas ofrecen varias ventajas, también presentan retos en el control del tamaño, la morfología y la reproducibilidad, ya que las condiciones de síntesis pueden variar según la forma de extracción o los organismos empleados.^{11,12} Aun así, la síntesis verde de nanomateriales se ha posicionado como una alternativa prometedora para desarrollar de manera más responsable nanomateriales, con alta eficiencia y menor impacto ambiental.^{10–13}

APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA VERDE EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad, la nanotecnología verde se integra gradualmente en diversas áreas para desarrollar soluciones más eficientes sin sacrificar el bienestar ambiental. El desarrollo e implementación de la nanotecnología verde no se limitan únicamente a la producción de nanomateriales eficientes y funcionales, sino que también deben considerar cómo se diseñan, se producen y se aplican para reducir el consumo de energía y materias primas, evitar el uso de sustancias peligrosas, disminuir la generación de residuos y considerar el ciclo de vida completo de los productos.¹⁷ En las siguientes subsecciones se presentan ejemplos de aplicaciones actuales en los ámbitos biomédico, energético, agrícola y medioambiental, destacando su aporte en cada uno de ellos.

Aplicaciones biomédicas

En el ámbito médico, la nanotecnología verde ha cobrado relevancia en los últimos años, pues permite diseñar tratamientos y métodos de diagnóstico de diversas enfermedades mediante nanomateriales más seguros, lo que mejora su biocompatibilidad y su ciclo de vida. Se destaca el potencial de la nanotecnología verde para la liberación dirigida de fármacos y para terapias contra el cáncer, entre otros. Sin embargo, no se pueden minimizar los retos que implica el uso de esta tecnología, como su potencial toxicidad y la estandarización de los procesos.² Actualmente, se han desarrollado agentes terapéuticos mediante nanopartículas metálicas (Ag y Au) recubiertas con extractos naturales

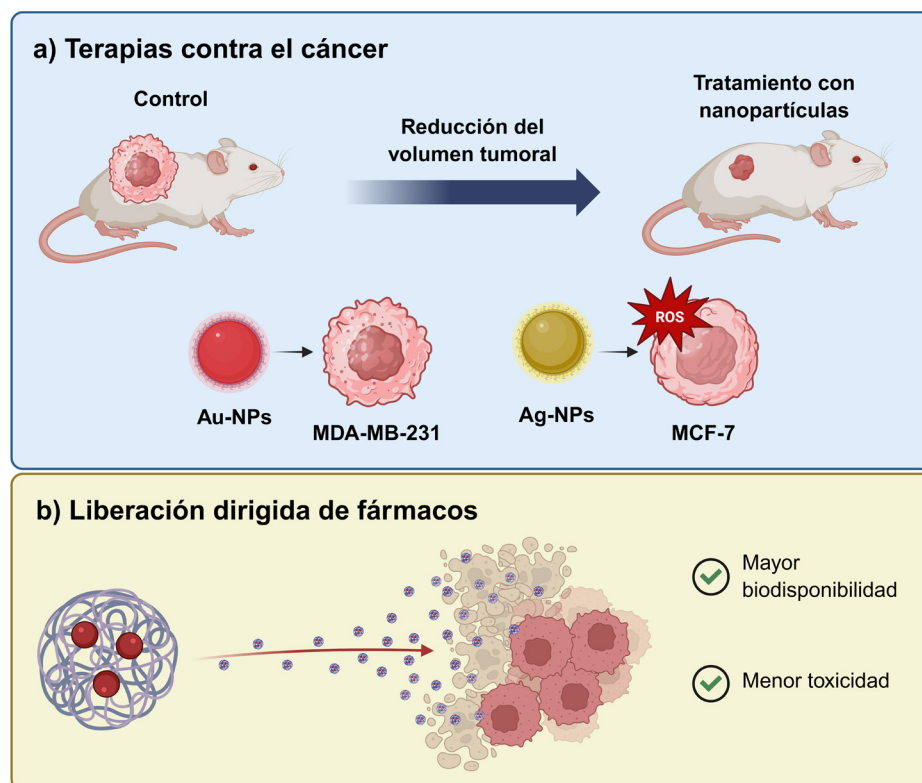


Figura 2. Aplicaciones biomédicas de la nanotecnología verde: a) terapias contra el cáncer mediante nanopartículas metálicas, b) liberación dirigida de fármacos. Imágenes basadas en Khoobchandani, M.; Katti, K. K.; Karikachery, A. R.; Thipe, V. C.; Srisimal, D.; Dhurvas Mohandoss, D. K.; Darshakumar, R. D.; Joshi, C. M.; Katti, K. V. *New Approaches in Breast Cancer Therapy Through Green Nanotechnology and Nano-Ayurvedic Medicine – Pre-Clinical and Pilot Human Clinical Investigations. IJN 2020, Volume 15, 181–197*; Martínez-Sanmiguel, J. J.; Zarate-Triviño, D.; García-García, M. P.; García-Martín, J. M.; Mayoral, Á.; Huttel, Y.; Martínez, L.; Cholula-Díaz, J. L. *Antitumor Activity of Bimetallic Silver/Gold Nanoparticles against MCF-7 Breast Cancer Cells. RSC Adv. 2024, 14 (53), 39102–39111*; Jahangirian, H.; Ghasemian Lemraski, E.; Webster, T. J.; Rafiee-Moghaddam, R.; Abdollahi, Y. *A Review of Drug Delivery Systems Based on Nanotechnology and Green Chemistry: Green Nanomedicine. IJN 2017, Volume 12, 2957–2978*.

(Figura 2). Por ejemplo, Khoobchandani *et al.*¹⁸ reportaron la formulación de nanopartículas de oro (Au NPs) a partir de un extracto de mangiferina procedente de la cáscara de mango y evaluaron sus propiedades citotóxicas en la línea celular de cáncer de mama MDA-MB-231. Las Au NPs mostraron resultados prometedores al reducir aproximadamente el 80% del volumen tumoral en ratones con inmunodeficiencia combinada grave (IDCG). Adicionalmente, se reporta el uso de nanopartículas bimetalicas Ag/Au (Ag/Au NPs) estabilizadas con almidón como agentes terapéuticos contra la línea celular de cáncer de mama MCF-7, las cuales presentaron efectos citotóxicos asociados a especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) y al daño del ADN.¹⁹ Otra aplicación biomédica se relaciona con el uso de nanoestructuras como “vehículos” para la liberación dirigida de fármacos.²⁰ Estas nanoestructuras son diseñadas utilizando biomateriales o extractos vegetales para desarrollar alternativas más amigables, con menor toxicidad y mayor biodisponibilidad en el cuerpo.²⁰ La nanomedicina verde está demostrando propiedades prometedoras al emplear nanopartículas metálicas preparadas con compuestos naturales para mejorar su interacción con el organismo. Sin embargo, su avance hacia la aplicación clínica está condicionado por su capacidad de garantizar la seguridad del paciente, lo que representa un conjunto de retos para el futuro que implican la comprensión de su biodistribución y bioacumulación, así como su dosificación y escalamiento, mientras, a la vez, se garantizan la calidad y la reproducibilidad.

Aplicaciones energéticas

En el ámbito energético, la nanotecnología verde ha comenzado a desempeñar un papel cada vez más relevante en el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles. El uso de nanomateriales permite optimizar las propiedades electrónicas, ópticas y catalíticas, que influyen directamente en el desempeño de tecnologías como las celdas solares, las baterías y los catalizadores para la producción de combustibles

limpios (Figura 3). Diversos estudios destacan que estas nanoestructuras pueden aumentar la eficiencia energética, lo que contribuye al desarrollo de sistemas más sostenibles.^{21,22}

En los últimos años se han reportado ejemplos de nanopartículas sintetizadas mediante rutas verdes empleadas en dispositivos de conversión de energía solar. Por ejemplo, Akinawo²² señala que nanomateriales como el TiO_2 y el ZnO , sintetizados mediante rutas verdes, han sido incorporados en celdas solares sensibilizadas con colorante (DSSC, por sus siglas en inglés), actuando como materiales fotoactivos que favorecen el transporte de electrones tras la absorción de luz.

Por otra parte, los nanomateriales desempeñan un papel clave en el almacenamiento de energía. Mohammed *et al.*²³, por ejemplo, destacan que los materiales nanoestructurados utilizados en electrodos pueden mejorar el transporte de iones y electrones en baterías, aumentando su capacidad y estabilidad debido a su mayor área superficial y conductividad. En este contexto, las baterías de estado sólido han surgido como una alternativa prometedora, ya que sustituyen el electrolito líquido por electrolitos sólidos nanoestructurados, basados en materiales como óxidos de litio, lantano y circonio (LLZO) u oxinitruro de fósforo y litio (LiPON), y pueden combinarse con cátodos basados en LiNiMnCoO_2 y ánodos de silicio o grafito para incrementar la densidad energética y mejorar la seguridad del sistema.²⁴

Finalmente, los nanomateriales también han sido estudiados como electrocatalizadores en procesos de producción de energía limpia. Los catalizadores nanoestructurados pueden mejorar la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno o la reducción electroquímica del dióxido de carbono (CO_2) y constituyen materiales clave para el desarrollo de sistemas energéticos de bajas emisiones. Los nanomateriales usados en catálisis tienen las características de poseer áreas superficiales altas y ser ricos en sitios activos insaturados, lo que incrementa drásticamente la adsorción de los reactivos y velocidades de reacción.^{25,26}

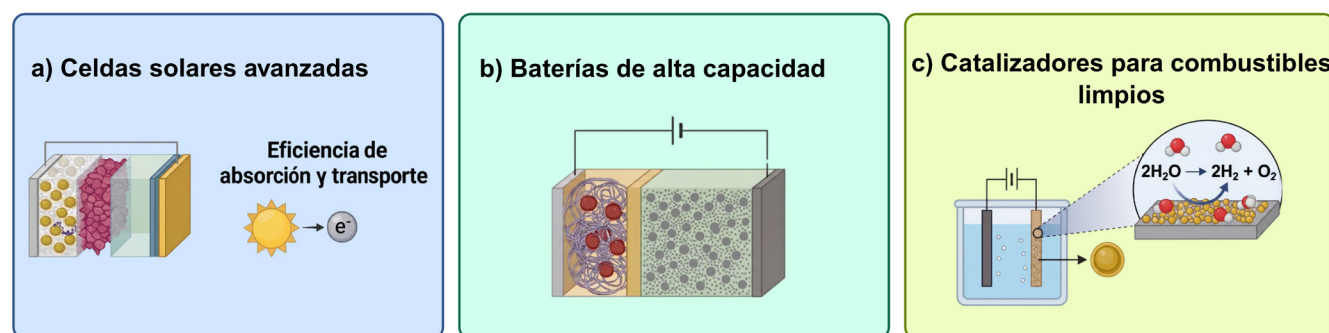


Figura 3. Aplicaciones energéticas de la nanotecnología verde: a) celdas solares avanzadas con mejoras en la absorción y el transporte de cargas; b) baterías de alta capacidad basadas en nanomateriales; c) catalizadores para combustibles limpios, incluidos los procesos de electrólisis del agua para la producción de hidrógeno. Basado en Mohammed, H.; Mia, M. F.; Wiggins, J.; Desai, S. *Nanomaterials for Energy Storage Systems—A Review. Molecules* **2025**, *30* (4), 883; Nzereogu, P. U.; Oyesanya, A.; Ogba, S. N.; Ayanwunmi, S. O.; Sobajo, M. S.; Chimsunum, V. C.; Ayanwunmi, V. O.; Amoo, M. O.; Adefemi, O. T.; Chukwudi, C. C. *Solid-State Lithium-Ion Battery Electrolytes: Revolutionizing Energy Density and Safety. Hybrid Advances* **2025**, *8*, 100339; Raveendran, A.; Chandran, M.; Dhanusuraman, R. *A Comprehensive Review on the Electrochemical Parameters and Recent Material Development of Electrochemical Water Splitting Electrocatalysts. RSC Adv.* **2023**, *13* (6), 3843–3876.

En conjunto, estos avances muestran el potencial de los nanomateriales para mejorar las tecnologías energéticas actuales. Sin embargo, su aplicación a gran escala aún enfrenta retos relacionados con la estabilidad de los materiales, el costo de producción y la integración en dispositivos comerciales.

Aplicaciones agrícolas

En la agricultura, la nanotecnología verde ha comenzado a emplearse como herramienta para mejorar el aprovechamiento de los insumos y reducir la pérdida de producto durante el proceso (**Figura 4**). En lugar de aplicar fertilizantes o pesticidas de manera masiva y descontrolada, se busca su liberación controlada para asegurar la dosis adecuada según las necesidades de las plantas. Para lograrlo, la nanotecnología verde es de gran importancia, ya que suelen emplearse materiales biodegradables o de origen biológico como base de las formulaciones.²⁷ Algunos estudios recientes describen el uso de nanopartículas y recubrimientos basados en polisacáridos para encapsular fertilizantes o pesticidas.²⁸ Estos sistemas pueden responder a factores ambientales, tales como pH, temperatura o humedad, ayudando a reducir procesos de lixiviación, volatilización y sobredosificación, mejorando el uso de nutrientes y disminuyendo las pérdidas hacia el suelo y los cuerpos de agua.²⁸

Otra aplicación importante de la nanotecnología verde en la agricultura es el desarrollo de sensores para la agricultura de precisión. Trabajos recientes resaltan la capacidad de integración de estos dispositivos con el IoT ("Internet de las cosas"), el análisis de datos y la inteligencia artificial, lo que permite monitorear variables como la humedad, la temperatura, el estado del suelo y la salud de los cultivos.^{29–31} Recientemente, se han desarrollado nanobiosensores electroquímicos, piezoeléctricos, térmicos, ópticos y basados en la transferencia de energía por resonancia de fluorescencia (FRET, por sus siglas en inglés) que permiten detectar patógenos, toxinas o estrés abiótico de forma rápida.^{30,32–37} Esto abre la posibilidad de detectar e intervenir en los cultivos antes de que una plaga o enfermedad se extienda y los dañe.

Si bien el uso de la nanotecnología verde en aplicaciones industriales parece prometedor, aún falta información sobre su comportamiento en el suelo, su posible acumulación y sus efectos sobre otros organismos.

Remediación ambiental

En la remediación ambiental, la nanotecnología verde ha despertado gran interés debido a las propiedades de los nanomateriales obtenidos mediante medios

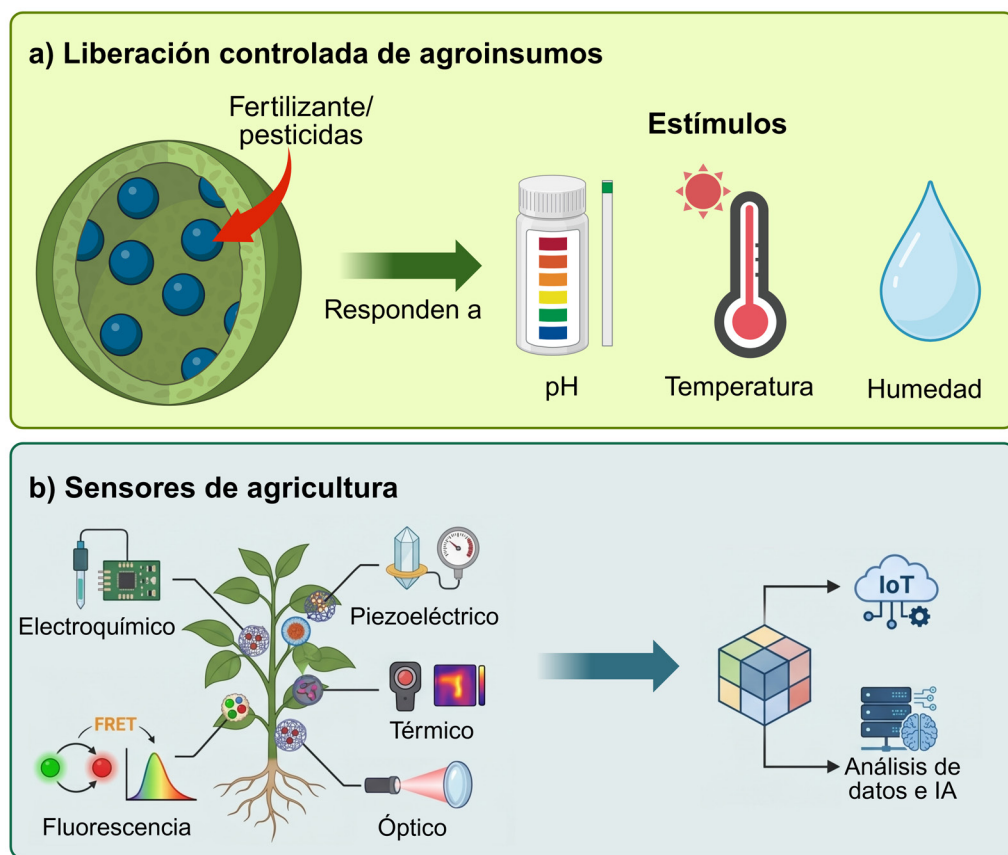


Figura 4. Aplicaciones agrícolas de la nanotecnología verde: a) liberación controlada de agroinsumos mediante nanoencapsulación; b) sensores para agricultura de precisión, incluyendo sensores electroquímicos, piezoeléctricos, térmicos, fluorescentes y ópticos, integrados con IoT e Inteligencia Artificial. Basado en Mashauri, R.; Li, K.; Li, S.; Shuai, L.; Song, L.; Chen, X.; Wang, L. *Review of Recent Advances in Pesticide Encapsulation Using Naturally-Occurring Carbohydrate-Based Delivery Systems: Environmental and Economic Benefits. International Journal of Biological Macromolecules* **2025**, *332*, 148705; Soussi, A.; Zero, E.; Sacile, R.; Trinchero, D.; Fossa, M. *Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. Sensors* **2024**, *24* (8), 2647; Chaturvedi, A.; Tripathi, D.; Ranjan, R. *Nano-Enabled Biosensors in Early Detection of Plant Diseases. Front. Nanotechnol.* **2025**, *7*, 1545792.

sustentables: alta área superficial, alta reactividad y superficies funcionalizables. Estas nanoestructuras han sido estudiadas para eliminar metales pesados, colorantes y otros contaminantes emergentes que los tratamientos convencionales no eliminan fácilmente (**Figura 5**).³⁸⁻⁴⁰ Una de las aplicaciones más utilizadas es la fotocatalisis. En esta aplicación, nanomateriales semiconductores, como TiO_2 o ZnO , aprovechan la luz para generar especies reactivas que degradan moléculas orgánicas presentes en el agua.^{38,40,41} Los estudios en este ámbito destacan el uso de la nanotecnología para reducir la carga de contaminantes difíciles de tratar en las aguas residuales; sin embargo, su eficacia depende de factores ambientales como la intensidad de la luz, el pH y la turbidez.⁴⁰

Otra aplicación de gran importancia es la adsorción de contaminantes, cuyo objetivo es capturarlos en la superficie del nanomaterial.³⁹ En trabajos previos se reporta una amplia gama de nanoadsorbentes, tales como materiales de carbono, zeolitas, óxidos metálicos, sílice, polímeros y redes metal-orgánicas (MOFs, por sus siglas en inglés), entre otros, que han mostrado alta afinidad por iones metálicos y otros contaminantes del agua.³⁹ Su potencial radica en la capacidad de diseñarlos con múltiples sitios activos y defectos en la red cristalina,⁴² lo que favorece una adsorción más rápida y eficiente de los contaminantes.³⁹

En conjunto, la fotocatalisis y la adsorción evidencian el potencial de la nanotecnología verde para la remediación

ambiental. Sin embargo, aún persisten retos asociados al uso de materiales escalables y seguros para el medio ambiente.

CONCLUSIONES

La nanotecnología verde se posiciona como una herramienta prometedora para diseñar materiales y procesos más eficientes y sostenibles. En el presente trabajo se han destacado las diversas aplicaciones biomédicas, energéticas, agrícolas y de remediación ambiental de los nanomateriales, que contribuyen a la eficiencia funcional y al aprovechamiento de recursos. Los nanomateriales obtenidos por métodos sustentables han permitido diseñar nuevas terapias y sistemas de liberación dirigida de fármacos, disminuyendo los efectos secundarios asociados a algunos medicamentos; por otro lado, han permitido el desarrollo de sistemas de producción y almacenamiento de energía más eficientes y limpios, han impulsado alternativas innovadoras para la liberación controlada de agroinsumos en cultivos y han permitido controlar parámetros críticos en la industria agrícola. Finalmente, han demostrado propiedades fotocatalíticas y de adsorción de contaminantes excepcionales, lo que contribuye a la remediación del medio ambiente y, con ello, a un planeta más limpio. Si bien la incorporación de la nanotecnología verde a gran escala aún presenta desafíos por resolver, estos nanomateriales abren nuevas posibilidades de innovación responsable y verdaderamente sostenible, en sintonía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).



Figura 5. Aplicaciones de la nanotecnología verde en la remediación ambiental: a) degradación fotocatalítica de contaminantes mediante especies reactivas de oxígeno (ROS); b) adsorción de contaminantes mediante nanoadsorbentes de carbono, zeolitas, óxidos metálicos, polímeros y MOFs. Basado en Zakir et al., J. Water Process Eng. 2025; Hussein et al., RSC Adv. 2025; Asghar et al., J. Nanobiotechnol. 2024; Lu, Catalysts 2025. Basado en Zakir, O.; Ait-Karra, A.; Khardazi, S.; Idouhli, R.; Khadiri, M. E.; Dikici, B.; Aboulaich, A.; Outzourhit, A.; Abouelfida, A. [Recent Progress in Nanomaterials for Water Treatment: A Comprehensive Review of Adsorption, Photocatalytic, and Antibacterial Applications.](#) Journal of Water Process Engineering 2025, 72, 107566; Hussein, E. B.; Rasheed, F. A.; Mohammed, A. S.; Kayani, K. F. [Emerging Nanotechnology Approaches for Sustainable Water Treatment and Heavy Metals Removal: A Comprehensive Review.](#) RSC Adv. 2025, 15 (48), 41061–41107; Asghar, N.; Hussain, A.; Nguyen, D. A.; Ali, S.; Hussain, I.; Junejo, A.; Ali, A. [Advancement in Nanomaterials for Environmental Pollutants Remediation: A Systematic Review on Bibliometrics Analysis, Material Types, Synthesis Pathways, and Related Mechanisms.](#) J Nanobiotechnol 2024, 22 (1), 26; Lu, X. [Photocatalytic Nanomaterials for Environmental Purification.](#) Catalysts 2025, 16 (1), 13

REFERENCIAS

1. Tsu, R.; Zhang, Q. Nanostructured Electronics and Optoelectronics Materials. En *Nanostructured Materials: Processing, Properties and Applications*, Koch, C. C., Ed.; William Andrew Publishing: Norwich, NY, 2006; 677-719.
2. Nath, D.; Banerjee, P. Green Nanotechnology – A New Hope for Medical Biology. *Environmental Toxicology and Pharmacology* **2013**, *36* (3), 997–1014.
3. Medina-Cruz, D.; Mostafavi, E.; Vernet-Crua, A.; Cheng, J.; Shah, V.; Choluta-Díaz, J. L.; Guisbiers, G.; Tao, J.; García-Martín, J. M.; Webster, T. J. Green Nanotechnology-Based Drug Delivery Systems for Osteogenic Disorders. *Expert Opinion on Drug Delivery* **2020**, *17* (3), 341–356.
4. Medina Cruz, D.; Mostafavi, E.; Vernet-Crua, A.; Barabadi, H.; Shah, V.; Choluta-Díaz, J. L.; Guisbiers, G.; Webster, T. J. Green Nanotechnology-Based Zinc Oxide (ZnO) Nanomaterials for Biomedical Applications: A Review. *J. Phys. Mater.* **2020**, *3* (3), 034005.
5. Cruz, D. M.; Mostafavi, E.; Vernet-Crua, A.; O'Connell, C. P.; Barabadi, H.; Mobini, S.; Choluta-Díaz, J. L.; Guisbiers, G.; García-Martín, J. M.; Webster, T. J. Green Nanotechnology and Nanoselenium for Biomedical Applications. In *Nanomedicine*; Elsevier, 2023; pp 339–380.
6. Larrañaga-Tapia, M.; Betancourt-Tovar, B.; Videia, M.; Antunes-Ricardo, M.; Choluta-Díaz, J. L. Green Synthesis Trends and Potential Applications of Bimetallic Nanoparticles towards the Sustainable Development Goals 2030. *Nanoscale Adv.* **2024**, *6* (1), 51–71.
7. Benko, A.; Truong, L. B.; Medina-Cruz, D.; Mostafavi, E.; Choluta-Díaz, J. L.; Webster, T. J. Green Nanotechnology in Cardiovascular Tissue Engineering. In *Tissue Engineering*; Elsevier, 2022; pp 237–281.
8. Anastas, P. T.; Warner, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*; Oxford University Press: Oxford, 2000.
9. Hutchison, J. E. Greener Nanoscience: A Proactive Approach to Advancing Applications and Reducing Implications of Nanotechnology. *ACS Nano* **2008**, *2* (3), 395–402.
10. Iravani, S. Green Synthesis of Metal Nanoparticles Using Plants. *Green Chem.* **2011**, *13* (10), 2638.
11. Das, R. K.; Brar, S. K. Plant Mediated Green Synthesis: Modified Approaches. *Nanoscale* **2013**, *5* (21), 10155.
12. Kharissova, O. V.; Dias, H. V. R.; Kharisov, B. I.; Pérez, B. O.; Pérez, V. M. J. The Greener Synthesis of Nanoparticles. *Trends in Biotechnology* **2013**, *31* (4), 240–248.
13. Lomeli-Marroquín, D.; Medina Cruz, D.; Nieto-Argüello, A.; Vernet Crua, A.; Chen, J.; Torres-Castro, A.; Webster, T. J.; Choluta-Díaz, J. L. Starch-Mediated Synthesis of Mono- and Bimetallic Silver/Gold Nanoparticles as Antimicrobial and Anticancer Agents. *IJN* **2019**, *Volume 14*, 2171–2190.
14. Sintubin, L.; De Windt, W.; Dick, J.; Mast, J.; Van Der Ha, D.; Verstraete, W.; Boon, N. Lactic Acid Bacteria as Reducing and Capping Agent for the Fast and Efficient Production of Silver Nanoparticles. *Appl Microbiol Biotechnol* **2009**, *84* (4), 741–749.
15. Mukherjee, P.; Senapati, S.; Mandal, D.; Ahmad, A.; Khan, M. I.; Kumar, R.; Sastry, M. Extracellular Synthesis of Gold Nanoparticles by the Fungus *Fusarium Oxysporum*. *ChemBioChem* **2002**, *3* (5), 461.
16. Agnihotri, M.; Joshi, S.; Kumar, A. R.; Zinjarde, S.; Kulkarni, S. Biosynthesis of Gold Nanoparticles by the Tropical Marine Yeast *Yarrowia Lipolytica* NCIM 3589. *Materials Letters* **2009**, *63* (15), 1231–1234.
17. Dhingra, R.; Naidu, S.; Upreti, G.; Sawhney, R. Sustainable Nanotechnology: Through Green Methods and Life-Cycle Thinking. *Sustainability* **2010**, *2* (10), 3323–3338.
18. Khoobchandani, M.; Katti, K. K.; Karikachery, A. R.; Thiye, V. C.; Srisimal, D.; Dhurvas Mohandoss, D. K.; Darshakumar, R. D.; Joshi, C. M.; Katti, K. V. New Approaches in Breast Cancer Therapy Through Green Nanotechnology and Nano-Ayurvedic Medicine – Pre-Clinical and Pilot Human Clinical Investigations. *IJN* **2020**, *Volume 15*, 181–197.
19. Martínez-Sanmiguel, J. J.; Zarate-Triviño, D.; García-García, M. P.; García-Martín, J. M.; Mayoral, Á.; Huttel, Y.; Martínez, L.; Choluta-Díaz, J. L. Antitumor Activity of Bimetallic Silver/Gold Nanoparticles against MCF-7 Breast Cancer Cells. *RSC Adv.* **2024**, *14* (53), 39102–39111.
20. Jahangirian, H.; Ghasemian Lemraski, E.; Webster, T. J.; Rafiee-Moghaddam, R.; Abdollahi, Y. A Review of Drug Delivery Systems Based on Nanotechnology and Green Chemistry: Green Nanomedicine. *IJN* **2017**, *Volume 12*, 2957–2978.
21. El-Esawy, M. A.; Elsharkawy, S.; Youssif, M. M.; Raafat Tartour, A.; Ramadan Elsharkawy, F.; Ahmed Saad Badr, S.; Elghoraby, A. M.; Elsayed Gad, M.; Etman, A. E.; Essam Mahmoud, F.; Emam, H. A.; al Zahraa A. Hasan, F.; Arafa, M. M.; Emad Mohamed, A.; Elsteha, S. R.; Zabinski, P. Recent Advances of Green Nanoparticles in Energy and Biological Applications. *Materials Today* **2024**, *72*, 117–139.
22. Akinawo, S. O. A Review on the Green Synthesis of Nanoparticles for Energy Conversion and Storage. *Kuwait Journal of Science* **2025**, *52* (3), 100434.
23. Mohammed, H.; Mia, M. F.; Wiggins, J.; Desai, S. Nanomaterials for Energy Storage Systems—A Review. *Molecules* **2025**, *30* (4), 88L3.
24. Nzereogu, P. U.; Oyesanya, A.; Ogba, S. N.; Ayanwunmi, S. O.; Sobajo, M. S.; Chimsunum, V. C.; Ayanwunmi, V. O.; Amoo, M. O.; Adefemi, O. T.; Chukwudi, C. C. Solid-State Lithium-Ion Battery Electrolytes: Revolutionizing Energy Density and Safety. *Hybrid Advances* **2025**, *8*, 100339.
25. Ravendran, A.; Chandran, M.; Dhanusuraman, R. A Comprehensive Review on the Electrochemical Parameters and Recent Material Development of Electrochemical Water Splitting Electrocatalysts. *RSC Adv.* **2023**, *13* (6), 3843–3876.
26. Li, L.; Li, X.; Sun, Y.; Xie, Y. Rational Design of Electrocatalytic Carbon Dioxide Reduction for a Zero-Carbon Network. *Chem. Soc. Rev.* **2022**, *51* (4), 1234–1252.
27. Mondéjar-López, M.; García-Simarro, M. P.; Navarro-Simarro, P.; Gómez-Gómez, L.; Ahrazem, O.; Niza, E. A Review on the Encapsulation of “Eco-Friendly” Compounds in Natural Polymer-Based Nanoparticles as next Generation Nano-Agrochemicals for Sustainable Agriculture and Crop Management. *International Journal of Biological Macromolecules* **2024**, *280*, 136030.
28. Mashauri, R.; Li, K.; Li, S.; Shuai, L.; Song, L.; Chen, X.; Wang, L. Review of Recent Advances in Pesticide Encapsulation Using Naturally-Occurring Carbohydrate-Based Delivery Systems: Environmental and Economic Benefits. *International Journal of Biological Macromolecules* **2025**, *332*, 148705.
29. Soussi, A.; Zero, E.; Sacile, R.; Trincherio, D.; Fossa, M. Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors* **2024**, *24* (8), 2647.
30. Chaturvedi, A.; Tripathi, D.; Ranjan, R. Nano-Enabled Biosensors in Early Detection of Plant Diseases. *Front. Nanotechnol.* **2025**, *7*, 1545792.
31. Lorenzo-Villegas, D. L.; Gohil, N. V.; Lamo, P.; Gurajala, S.; Bagiu, I. C.; Vulcanescu, D. D.; Horhat, F. G.; Sorop, V. B.; Diaconu, M.; Sorop, M. I.; Oprisoni, A.; Horhat, R. M.; Susan, M.; MohanaSundaram, A. Innovative Biosensing Approaches for Swift Identification of Candida Species, Intrusive Pathogenic Organisms. *Life* **2023**, *13* (10), 2099.
32. Ananias Reis, D.; Caon, N. B.; Giuliana, V.; Alexandre Luis, P.; Rosane Nora, C.; João Victor, N.; De Oliveira, I. R. W. Z. Electrochemical Biosensor Based on Gherkin (*Cucumis Anguria*)

- Peroxidase Immobilized on Chitosan-Coated Iron Oxide Nanoparticles for Phenolic Compounds Detection. *Electroanalysis* **2025**, *37* (1), e202400251.
33. Choudhary, M. K.; Agrawal, R.; Kumar, R.; Singh, P.; Gupta, B. R. K.; Singh, K. P. Detection of Cadmium-Resistant Rhizobacteria using Piezoelectric Nanobiosensor. *Int. J. Nanosci.* **2010**, *09* (05), 461–469.
 34. Cruz, A. F. D.; Norena, N.; Kaushik, A.; Bhansali, S. A Low-Cost Miniaturized Potentiostat for Point-of-Care Diagnosis. *Biosensors and Bioelectronics* **2014**, *62*, 249–254.
 35. Zhai, Z.; Leng, B.; Yang, N.; Yang, B.; Liu, L.; Huang, N.; Jiang, X. Rational Construction of 3D-Networked Carbon Nanowalls/ Diamond Supporting CuO Architecture for High-Performance Electrochemical Biosensors. *Small* **2019**, *15* (48), 1901527.
 36. Talari, F. F.; Bozorg, A.; Faridbod, F.; Vossoughi, M. A Novel Sensitive Aptamer-Based Nanosensor Using rGQDs and MWCNTs for Rapid Detection of Diazinon Pesticide. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2021**, *9* (1), 104878.
 37. Rong, Y.; Li, H.; Ouyang, Q.; Ali, S.; Chen, Q. Rapid and Sensitive Detection of Diazinon in Food Based on the FRET between Rare-Earth Doped Upconversion Nanoparticles and Graphene Oxide. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* **2020**, *239*, 118500.
 38. Zakir, O.; Ait-Karra, A.; Khardazi, S.; Idouhli, R.; Khadiri, M. E.; Dikici, B.; Aboulaich, A.; Outzourhit, A.; Abouelfida, A. Recent Progress in Nanomaterials for Water Treatment: A Comprehensive Review of Adsorption, Photocatalytic, and Antibacterial Applications. *Journal of Water Process Engineering* **2025**, *72*, 107566.
 39. Hussein, E. B.; Rasheed, F. A.; Mohammed, A. S.; Kayani, K. F. Emerging Nanotechnology Approaches for Sustainable Water Treatment and Heavy Metals Removal: A Comprehensive Review. *RSC Adv.* **2025**, *15* (48), 41061–41107.
 40. Asghar, N.; Hussain, A.; Nguyen, D. A.; Ali, S.; Hussain, I.; Junejo, A.; Ali, A. Advancement in Nanomaterials for Environmental Pollutants Remediation: A Systematic Review on Bibliometrics Analysis, Material Types, Synthesis Pathways, and Related Mechanisms. *J Nanobiotechnol* **2024**, *22* (1), 26.
 41. Lu, X. Photocatalytic Nanomaterials for Environmental Purification. *Catalysts* **2025**, *16* (1), 13.
 42. Calles García, M.; Martínez-Hernández, H. D.; Rosales, M.; Jiménez-Ruiz, M.; Martins, P. M.; Porro, J. M.; Lanceros-Mendez, S.; Petrenko, V.; de Fernández de Luis, R. Zirconium(IV)–Succimer Metal–Organic Framework Functionalized PVDF–HFP Membranes for Heavy-Metals Capture. *Chemistry – A European Journal* **2026**, *32* (22), e02811.

BIBLIOGRAFÍA ESENCIAL

1. Anastas, P. T.; Warner, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*; Oxford University Press Oxford, 2000.
2. Hutchison, J. E. Greener Nanoscience: A Proactive Approach to Advancing Applications and Reducing Implications of Nanotechnology. *ACS Nano* **2008**, *2* (3), 395–402.