

Recepción: 27.02.2026

Revisión: 31.03.2026

Publicación: 08.05.2026

<https://orcid.org/0009-0003-6859-7587>

<https://orcid.org/0000-0003-4392-7028>

<https://orcid.org/0009-0003-1371-7166>

NANOTECNOLOGÍA: DE LA PROMESA A LA PREOCUPACIÓN

NANOTECHNOLOGY: FROM PROMISE TO CONCERN

Cristian-Brayan Palacios-Cabrera* ¹

Alan-Javier Santiago-Cuevas¹

Eduardo-Daniel Tecuapa-Flores²

¹ Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria,
Ciudad de México

² Grupo de Investigación Desarrollo e Innovación en Ingeniería
de Procesos y Nuevos Materiales, Vicerrectoría de Investigación,
Universidad La Salle México, Ciudad de México 06140, México

Correos:

palacios_cabrera@hotmail.com

alan_javier_sc@hotmail.com

daniel.tecuapa@lasalle.mx

Resumen

La nanotecnología ha experimentado un crecimiento acelerado en las últimas décadas, consolidándose como un eje estratégico para el desarrollo tecnológico en múltiples áreas del conocimiento. No obstante, al tratarse de una disciplina relativamente reciente, aún persisten incertidumbres significativas respecto a sus posibles efectos a mediano y largo plazo sobre el medio ambiente y la salud humana. En particular, la nanotecnología ambiental, orientada a la remediación de contaminantes en agua, suelo y aire, ha propuesto soluciones altamente innovadoras y eficientes. Sin embargo, la misma naturaleza fisicoquímica que confiere a los nanomateriales propiedades únicas, como su elevada área superficial, reactividad y capacidad de interacción específica, también puede asociarse con riesgos toxicológicos variables, dependientes del tipo de nanopartícula, su composición, tamaño, morfología y condiciones de exposición. Diversos estudios han documentado que ciertos nanomateriales pueden inducir efectos adversos tales como alteraciones genéticas, disrupción endocrina, bioacumulación en cadenas tróficas, liberación o transporte de metales pesados y toxicidad aguda o crónica en organismos vegetales y animales. Asimismo, los procesos de síntesis y funcionalización de estos materiales pueden generar subproductos y residuos potencialmente problemáticos, incluyendo polímeros de baja biodegradabilidad y desechos de sales metálicas. En este contexto, resulta necesario evaluar de manera integral el impacto ambiental asociado a cada etapa del ciclo de vida de las tecnologías basadas en nanomateriales, desde su producción hasta su disposición final. El presente trabajo compendia y analiza la evidencia disponible sobre los principales riesgos ambientales vinculados al desarrollo y aplicación de la nanotecnología.

Palabras clave: *Nanotecnología, ambiente, salud, tecnología.*

Abstract

Nanotechnology has undergone rapid expansion in recent decades, becoming a strategic driver of technological development across multiple scientific disciplines. However, as a relatively recent field, significant uncertainties remain regarding its medium- and long-term effects on both the environment and human health. Environmental nanotechnology focuses on the remediation of contaminants in water, soil, and air, offering highly innovative and efficient solutions. Nevertheless, the same physicochemical characteristics that provide nanomaterials with unique properties, such as high surface area, enhanced reactivity, and specific interaction capabilities, may also be associated with variable toxicological risks, depending on the type of nanoparticle, its composition, size, morphology, and exposure conditions. Several studies have reported that certain nanomaterials can induce adverse effects, including genetic alterations, endocrine disruption, bioaccumulation within trophic chains, mobilization or transport of heavy metals, and acute or chronic toxicity in plant and animal organisms. In addition, synthesis and functionalization

processes may generate potentially hazardous by-products and residues, such as poorly biodegradable polymers and metal salt waste. Therefore, a comprehensive assessment of the environmental impact associated with each stage of the life cycle of nanotechnology-based systems from production to final disposal is essential. This work compiles and analyzes current evidence regarding the principal environmental risks linked to the development and application of nanotechnology.

Keywords: *Nanotechnology, environment, health, technology.*

Introducción

La intensificación de los procesos de industrialización y urbanización, incluyendo actividades como transporte, manufactura, construcción, refinación petroquímica y minería, ha incrementado de manera significativa la presión sobre los recursos naturales y la generación de residuos peligrosos. Estos procesos contribuyen a la liberación sistemática de contaminantes en aire, agua y suelo, alterando los equilibrios biogeoquímicos y representando un riesgo directo para la salud humana y la estabilidad de los ecosistemas. En la atmósfera predominan gases tóxicos como los óxidos de nitrógeno y azufre, los óxidos de carbono, el ozono troposférico, el material particulado y diversos compuestos orgánicos volátiles. En suelos y cuerpos de agua se acumulan metales pesados, como plomo, arsénico, aluminio y cadmio, y más recientemente, contaminantes emergentes tales como pesticidas, fármacos, colorantes y retardantes de flama, los cuales pueden ingresar al organismo humano por inhalación, ingestión o absorción dérmica (Ibrahim et al., 2016; Li et al., 2020; Muñoz & Saquero, 2018).

Este panorama ha impulsado la demanda de tecnologías más eficientes, sostenibles y económicamente viables para la prevención, monitoreo y tratamiento de contaminantes, con

el objetivo de reducir impactos ambientales sin generar efectos secundarios significativos (Ike et al., 2018; Islam & Islam, 2025; Padil et al., 2018).

La nanotecnología y la nanociencia están desempeñando cada vez un papel más importante para aportar soluciones nuevas e innovadoras para una gran gama de desafíos ambientales, esto debido a que tienen un enorme potencial para proporcionar soluciones en los diferentes campos de remediación ambiental. Estas investigaciones se han ido incrementando en las últimas décadas y sus descubrimientos son tan bastos que han dado como resultado nuevos materiales revolucionarios llamados nanomateriales (NM) y nanopartículas (NPs) que poseen características y aplicaciones muy específicas (Huang et al., 2024; Ma et al., 2024; Usmani et al., 2017). Estos incluyen métodos mejorados para reducir la contaminación, el tratamiento del agua, la detección ambiental, la remediación y hacer que las fuentes de energía alternativas sean más rentables, amigables con el ambiente y sustentables (Beni & Jabbari, 2022; Kuhn et al., 2022; Prasad et al., 2025). Diversas aplicaciones han demostrado eficacia en procesos de descontaminación debido a su alta especificidad y selectividad funcional, como se muestra en la Figura 1.

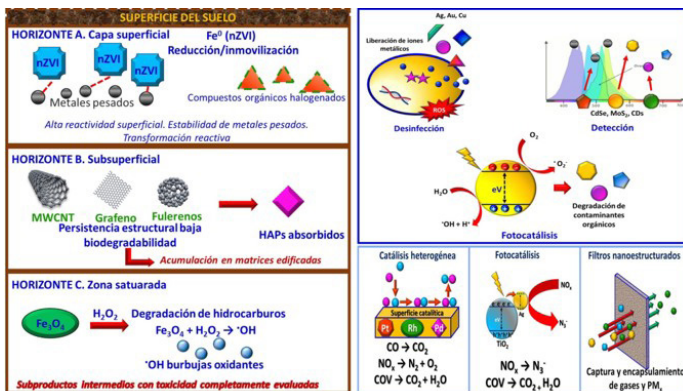


Figura 1. Usos típicos de la nanotecnología en los diferentes campos ambientales (Imagen re-elaborada con software GIMP y power point; iconos obtenidos en <https://www.freepik.es/iconos>).

Sin embargo, el carácter innovador de estos materiales también introduce desafíos importantes. La síntesis y funcionalización de nanomateriales puede implicar el uso de reactivos potencialmente peligrosos y generar residuos con propiedades persistentes o de difícil degradación. Además, el comportamiento ambiental posterior a su liberación incluyendo procesos de transformación, transporte, acumulación y

posible interacción con organismos vivos aún no se comprende completamente (Ale et al., 2023; Garbovskiy, 2017; Gelaye, 2024). Existe preocupación respecto a que, bajo ciertas condiciones, algunos nanomateriales puedan transformarse o interactuar de manera que incrementen su reactividad o toxicidad, generando efectos no previstos en organismos y ecosistemas (Bao et al., 2023; Dwivedi et al., 2018; Zabeo et al., 2019).

Uso de nanotecnología y nanopartículas en el medio ambiente

Se realizó una revisión sistemática narrativa con enfoque cualitativo-comparativo orientada a evaluar la evidencia científica sobre nanotoxicidad asociada al uso de nanomateriales en remediación ambiental. El diseño metodológico se estructuró en cuatro ejes: (i) identificación de nanomateriales empleados en agua, suelo y aire; (ii) caracterización de mecanismos de acción tecnológica; (iii) análisis de mecanismos toxicológicos y ecotoxicológicos; y (iv) evaluación preliminar del impacto a lo largo del ciclo de vida. Se efectuó una búsqueda en bases de datos científicas indexadas priorizando artículos de revisión y estudios experimentales publicados principalmente entre 2020 y 2025, complementados con referencias anteriores cuando fueron fundamentales para el marco conceptual. Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y español: “nanotoxicity”, “environmental nanotechnology”, “ecotoxicology of nanoparticles”, “life cycle assessment nanomaterials”, “ROS generation”, “ionic release”, “bioaccumulation”, “soil nanomaterials”, “aquatic toxicity nanoparticles” y “airborne nanoparticles risk” (Figura 2).

Los criterios de inclusión fueron:

1. Estudios experimentales in vitro, in vivo o ecotoxicológicos relacionados con nanomateriales aplicados a la remediación ambiental.
2. Revisiones críticas que aborden destino ambiental, transformación fisicoquímica o evaluación de riesgos.

3. Investigaciones que describen mecanismos de toxicidad (estrés oxidativo, genotoxicidad, inflamación, alteración microbiana).

Se excluyeron estudios enfocados exclusivamente en aplicaciones biomédicas sin vínculo ambiental directo. Los materiales identificados se agruparon según matriz ambiental de aplicación:

- Agua: nanopartículas metálicas (Ag, Au, Cu), óxidos semiconductores (TiO_2 , ZnO, Fe_2O_3 , CeO_2) y puntos cuánticos (CdSe, MoS_2 , CDs).
- Suelo: hierro de valencia cero (nZVI), magnetita (Fe_3O_4), nanotubos de carbono, grafeno y fullerenos.
- Aire: nanopartículas catalíticas (Pt, Pd, Rh), TiO_2 incorporado en materiales de construcción y filtros basados en grafeno/CNTs.

Se compararon reportes que incluyen aproximaciones de análisis de ciclo de vida (ACV) o evaluación de riesgo ambiental. La información recopilada se sistematizó en matrices comparativas que relacionaron: nanomaterial-aplicación-mecanismo-peligros. Se priorizó la identificación de patrones comunes, como correlaciones entre tamaño reducido y mayor reactividad biológica, o entre estabilidad coloidal y movilidad ambiental.

Se reconoce heterogeneidad en metodologías toxicológicas, variabilidad en condiciones experimentales y falta de estandarización en dosis y métricas (masa, número de partículas o

área superficial), lo que limita comparaciones directas. Asimismo, la escasez de estudios longitudinales dificulta inferencias sobre efectos crónicos.



Figura 2. Aplicaciones de la nanotecnología pero sus riesgos y consecuencias (Imagen realizada con software GIMP y power point; iconos obtenidos en <https://www.freepik.es/iconos>).

Riesgos a la salud humana y medio ambiente por el uso de nanopartículas y nanotecnologías

El análisis permitió identificar y clasificar los nanomateriales más utilizados en procesos de remediación ambiental en agua, suelo y aire, así como los posibles residuos generados desde su síntesis hasta su aplicación. Los resultados se estructuraron por matriz ambiental, especificando tipo de nanomaterial, función tecnológica y riesgos asociados (Figura 3).

Agua

El tratamiento de agua representa el campo con mayor desarrollo en nanotecnología ambiental. Se identificó el uso recurrente de nanopartículas metálicas de plata (Ag), oro (Au) y cobre (Cu), empleadas principalmente en procesos de desinfección debido a su actividad antimicrobiana y antifúngica, asociada a la liberación de iones metálicos y generación de especies reac-

tivas que afectan membranas celulares (Oh et al., 2018; Rosbero & Camacho, 2017). Asimismo, se reporta el uso de puntos cuánticos metálicos y carbonosos, tales como CdSe, MoS₂ y puntos cuánticos de carbono, en sistemas de detección de metales pesados y compuestos orgánicos. Su aplicación se fundamenta en sus propiedades ópticas y alta eficiencia de fluorescencia, que permiten detección selectiva y en tiempo real (Guo et al., 2017; Haldar et al., 2016; Zhong et al., 2018). En procesos de degradación de contaminantes orgánicos aromáticos, destacan los semiconductores como TiO₂, ZnO, Fe₂O₃ y CeO₂, utilizados en reacciones de oxidación avanzada mediante activación fotocatalítica. Estos materiales promueven la generación de radicales hidroxilos responsables de la mineralización parcial o total de contaminantes (Kefeni et al., 2017;

Youssef et al., 2018). No obstante, se documenta que su estabilidad coloidal, agregación y posible liberación iónica pueden modificar su perfil toxicológico en ambientes acuáticos.

Suelo

En la remediación de suelos contaminados se identificó el uso predominante de nanopartículas de hierro de valencia cero (nZVI), aplicadas en la estabilización y reducción de metales pesados, así como en la transformación reductiva de compuestos orgánicos halogenados. Su alta reactividad superficial permite la inmovilización de contaminantes, aunque su oxidación progresiva y movilidad en el subsuelo generan interrogantes sobre su destino ambiental (Kien A. Vu & Catherine N. Mulligan, 2023; Zhang et al., 2022). También se emplean nanomateriales carbonosos como nanotubos de carbono, grafeno y fullerenos, cuya elevada área superficial favorece procesos de adsorción de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados (Gil-Díaz et al., 2022; Zhao et al., 2019). Sin embargo, su persistencia estructural y baja biodegradabilidad plantean posibles riesgos de acumulación en matrices edáficas. Adicionalmente, se reporta el uso de magnetita nanométrica combinada con agentes oxidantes para la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados, aprovechando reacciones tipo Fenton heterogéneo. Estos sistemas pueden generar subproductos intermedios cuya toxicidad requiere evaluación adicional. (K. A. Vu & C. N. Mulligan, 2023).

Aire

En el control de contaminantes atmosféricos se identificó el desarrollo de catalizadores basados en nanopartículas metálicas de platino (Pt), rodio (Rh) y paladio (Pd), utilizados en la conversión catalítica de gases como CO, NOx y compuestos orgánicos volátiles. La reducción de tamaño a escala nanométrica incrementa el área activa y la eficiencia catalítica, prolongando su vida útil operativa (Le

et al., 2023; Wang et al., 2023). También se reporta la incorporación de grafeno y nanotubos de carbono en filtros inteligentes para la captura y encapsulamiento de gases y partículas finas, formando estructuras ultrafinas con alta capacidad de retención (Tucek et al., 2016; Wang et al., 2025). Incluso se ha llegado a promover la investigación del TiO₂ acoplado al cemento o a los vidrios para la limpieza del aire en carreteras o del aire en interiores (G. Mahy et al., 2018; Haghighi & Haghighat, 2024; Wei et al., 2023).

Residuos

En todas las categorías analizadas se identificó la generación de residuos asociados a la síntesis y funcionalización de nanopartículas. Estos incluyen sales metálicas residuales, agentes reductores, surfactantes, estabilizantes poliméricos y catalizadores ácidos o básicos. Dependiendo del método de producción, estos subproductos pueden presentar baja biodegradabilidad o requerir tratamientos especializados para su disposición final. El análisis integral permitió establecer que, aunque los nanomateriales presentan alta eficiencia en procesos de remediación, su comportamiento ambiental posterior incluyendo transformación, liberación iónica, agregación o interacción con organismos puede derivar en efectos ecotoxicológicos en plantas, microorganismos, fauna y potencialmente en seres humanos, como se sintetiza en la Tabla 1 y la Figura 3.

Tabla 1. Ejemplos del uso de nanotecnología y su impacto ambiental y salud humana

MATRIZ	NANOMATERIAL ESPECÍFICO	APLICACIÓN PRINCIPAL	MECANISMO DE ACCIÓN	POSIBLES EFECTOS AMBIENTALES Y EN SALUD	REF
AGUA	Nanopartículas de plata (Ag)	Desinfección antimicrobiana	Liberación de iones Ag ⁺ , daño a membranas celulares, generación de ROS	Toxicidad en organismos acuáticos, alteración de microbiota, bioacumulación, citotoxicidad	(Mat Lazim et al., 2023)
	Nanopartículas de oro (Au)	Desinfección y sensores	Interacción superficial y actividad catalítica	Potencial bioacumulación, efectos celulares dependientes de tamaño	(Nižnik et al., 2024)
	Nanopartículas de cobre (Cu/CuO)	Desinfección y degradación catalítica	Liberación de iones Cu ²⁺ , estrés oxidativo	Toxicidad acuática, daño branquial en peces, efectos genotóxicos	(Sielska & Skuza, 2025)
	Puntos cuánticos inorgánicos	Sensores de metales pesados	Fluorescencia dependiente de tamaño	Liberación de Cd ²⁺ , alta toxicidad, bioacumulación	(Q. Liu et al., 2022)
	Puntos cuánticos de carbono (CDs)	Detección y fotocatálisis	Emisión fluorescente, transferencia electrónica	Toxicidad variable, posible generación de ROS	(Xiang & Tan, 2022)
	TiO ₂	Fotocatálisis	Generación de radicales hidroxilos (•OH) bajo irradiación	Estrés oxidativo en organismos acuáticos, alteración celular	(Gatou et al., 2024)
	ZnO	Fotocatálisis y desinfección	Liberación de Zn ²⁺ , generación de ROS	Toxicidad en algas y peces, daño oxidativo	(Sharma et al., 2023)
	Fe ₂ O ₃	Procesos redox y adsorción	Transferencia electrónica	Posible acumulación en sedimentos	(Falciglia et al., 2022)
SUELO	Hierro de valencia cero (nZVI)	Reducción de metales pesados y compuestos halogenados	Reacciones reductivas superficiales	Movilidad en subsuelo, alteración microbiana, acumulación de óxidos	(Wu et al., 2024)
	Magnetita (Fe ₃ O ₄)	Fenton heterogéneo	Generación de radicales oxidantes	Formación de subproductos intermedios potencialmente tóxicos	(L. Liu et al., 2022)
	Nanotubos de carbono (CNTs)	Adsorción de contaminantes orgánicos	Alta área superficial, interacciones T-π	Persistencia, inflamación en organismos, bioacumulación	(Kim et al., 2024)
	Grafeno y óxido de grafeno	Adsorción y soporte catalítico	Interacción superficial y adsorción	Toxicidad en microorganismos del suelo, baja biodegradabilidad	(Das et al., 2023)
	Fullerenos	Captura de contaminantes orgánicos	Interacciones hidrofóbicas	Potencial transporte en agua subterránea, estrés oxidativo	(Hendricks et al., 2022)
AIRE	Pt (platino)	Conversión catalítica de CO y NOx	Catalizador heterogéneo	Liberación de partículas ultrafinas, riesgo inhalatorio	(Rajesh & Elumalai, 2025)
	Pd (paladio)	Conversión catalítica	Oxidación-reducción catalítica	Posible sensibilización respiratoria	(Samim, 2022)
	Rh (rodio)	Reducción de NOx	Actividad catalítica superficial	Riesgo por exposición ocupacional	(Kowalska et al., 2022)
	TiO ₂ incorporado en cemento/vidrio	Degradación fotocatalítica de NOx y COVs	Oxidación fotocatalítica superficial	Liberación de nanopartículas por desgaste	(Liu et al., 2025)
	Filtros con grafeno o CNTs	Captura de gases y partículas	Adsorción y encapsulamiento	Riesgo por liberación de fibras respirables	(Xu et al., 2022)

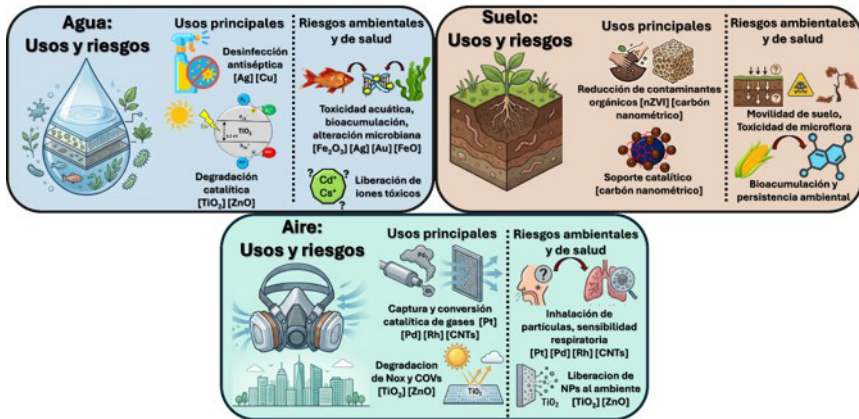


Figura 3. Nanopartículas usadas en los diferentes medios y sus efectos adversos (Imagen realizada con software GIMP y power point; iconos obtenidos en <https://www.freepik.es/iconos>).

Conclusiones

La nanotecnología ha consolidado un papel estratégico en el desarrollo de soluciones avanzadas para problemas energéticos, biomédicos e industriales, particularmente en el ámbito de la remediación ambiental. Sus propiedades fisicoquímicas diferenciadas, alta área superficial, reactividad controlada y capacidad de funcionalización han permitido diseñar materiales con elevada eficiencia en procesos de adsorción, degradación catalítica y detección selectiva de contaminantes. Sin embargo, el análisis realizado evidencia que estos beneficios tecnológicos no están exentos de implicaciones ambientales y sanitarias. A partir de la revisión presentada, se identificó que diversos nanomateriales utilizados en agua, suelo y aire pueden generar efectos adversos asociados a liberación iónica, generación de especies reactivas de oxígeno, persistencia estructural, bioacumulación y alteración de comunidades microbianas. Asimismo, la etapa de síntesis puede implicar el uso de precursores químicos reactivos, surfactantes y agentes estabilizantes que originan residuos de difícil tratamiento o disposición final. Esto indica que el impacto potencial no se limita a la fase de aplicación, sino que debe evaluarse a lo largo del ciclo de vida completo del material. La evidencia

también muestra que aún existen vacíos importantes en la comprensión del destino ambiental, transformación fisicoquímica y efectos crónicos a largo plazo de muchos nanomateriales. En este sentido, resulta indispensable fortalecer los estudios toxicológicos, ecotoxicológicos y de análisis de ciclo de vida, así como promover marcos regulatorios más específicos que establezcan criterios claros para su producción, uso y disposición. La estandarización de protocolos y la evaluación de riesgos basada en evidencia científica son elementos clave para garantizar un desarrollo responsable. Paralelamente, se observa un avance en estrategias de síntesis más sostenibles, particularmente aquellas alineadas con principios de química verde, que buscan sustituir reactivos corrosivos o tóxicos por extractos vegetales u otros agentes menos agresivos, y reducir condiciones extremas de presión y temperatura. Si bien estas alternativas no eliminan por completo los riesgos, representan una transición hacia modelos de producción con menor impacto ambiental.

En términos generales, la nanotecnología no debe entenderse únicamente como una promesa tecnológica ni como una amenaza potencial, sino

como una herramienta cuyo valor depende de su diseño, regulación y aplicación responsable. La investigación en este campo continúa siendo pertinente y necesaria, siempre que se desarrolle bajo criterios de seguridad, control ambiental

y responsabilidad ética. El desafío no radica en detener su avance, sino en integrar de manera sistemática la evaluación de riesgos y la sostenibilidad como componentes inseparables de la innovación científica.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del escrito, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Descargo de Responsabilidad (Inteligencia Artificial) Los autores declaran por la presente que NO se han utilizado tecnologías de IA generativa, tales como modelos de lenguaje grandes (ChatGPT, COPILOT, etc.) y generadores de texto a imagen, durante la redacción o edición de este manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Revista Digital Internacional de Divulgación Científica del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por dar a conocer las diversas temáticas que deben ser conocidas por los lectores. Cristian-B. Palacios-C. y Alan-J. Santiago-C. Agradecen a SECIHTI las becas doctorales en el Programa de Maestría y doctorado en ingeniería ambiental, UNAM (folio: 002591), otorgadas durante esta investigación.

GLOSARIO

Adsorción: Proceso fisicoquímico mediante el cual moléculas o iones se adhieren a la superficie de un material sólido, como ocurre en nanomateriales utilizados para capturar contaminantes en agua o suelo.

Agentes oxidantes: Sustancias capaces de aceptar electrones durante una reacción química, promoviendo la degradación de contaminantes mediante procesos de oxidación.

Agregación: Proceso por el cual nanopartículas individuales se agrupan formando estructuras de mayor tamaño, lo que puede modificar su movilidad y toxicidad ambiental.

Bioacumulación: Acumulación progresiva de una sustancia en un organismo cuando la tasa de absorción supera la de eliminación.

Catalizador heterogéneo: Material que acelera una reacción química sin consumirse, encontrándose en una fase distinta a la de los reactivos, como las nanopartículas metálicas en convertidores catalíticos.

Contaminantes emergentes: Sustancias recientemente detectadas en el ambiente, como fármacos, pesticidas o retardantes de flama, cuyos efectos a largo plazo aún se investigan.

Desinfección antimicrobiana: Eliminación o inactivación de microorganismos mediante agentes físicos o químicos, incluyendo nanopartículas metálicas con actividad biocida.

Disrupción endocrina: Alteración del sistema hormonal causada por sustancias químicas que interfieren con la síntesis, liberación o acción de hormonas.

Ecotoxicidad: Capacidad de una sustancia para generar efectos adversos en organismos y ecosistemas.

Estrés oxidativo: Desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la capacidad antioxidante de un sistema biológico, que puede provocar daño celular.

Fotocatálisis: Proceso en el cual un material semiconductor activado por luz promueve reacciones químicas, comúnmente utilizado para degradar contaminantes orgánicos.

Generación de radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$): Formación de especies altamente reactivas capaces de oxidar compuestos orgánicos durante procesos de oxidación avanzada.

Hierro de valencia cero (nZVI): Nanopartículas de hierro metálico empleadas en la reducción y estabilización de contaminantes en suelos y aguas subterráneas.

Edáfica: Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que influyen directamente en el crecimiento de las plantas, la distribución de organismos y la biodiversidad.

Liberación iónica: Proceso mediante el cual nanopartículas metálicas liberan iones al medio, lo que puede contribuir tanto a su efecto antimicrobiano como a su toxicidad.

Magnetita nanométrica (Fe_3O_4): Óxido de hierro con propiedades magnéticas utilizado en procesos de degradación catalítica y separación magnética.

Materia orgánica natural (NOM): Conjunto de compuestos orgánicos presentes en ambientes naturales que pueden interactuar con nanomateriales modificando su comportamiento.

Nanomaterial: Material con al menos una dimensión en el rango de 1 a 100 nanómetros que presenta propiedades fisicoquímicas distintas a las de su forma macroscópica.

Nanopartícula (NP): Partícula sólida en escala nanométrica con propiedades ópticas, electrónicas o catalíticas específicas.

Nanopartículas metálicas: Partículas nanométricas compuestas por metales como plata, oro, cobre, platino o paladio, utilizadas en desinfección y catálisis.

Nanomateriales carbonosos: Materiales basados en carbono a escala nanométrica, como nanotubos de carbono, grafeno y fullerenos, empleados en adsorción y soporte catalítico.

Óxidos metálicos semiconductores: Materiales como TiO_2 o ZnO que presentan propiedades electrónicas que permiten procesos fotocatalíticos.

Oxidación avanzada: conjunto de procesos que generan especies altamente reactivas para degradar contaminantes persistentes.

Persistencia ambiental: Capacidad de un material para permanecer en el ambiente sin degradarse durante periodos prolongados.

Puntos cuánticos: nanocristales semiconductores con propiedades ópticas dependientes de su tamaño, utilizados en sensores y aplicaciones fotónicas.

Reacciones tipo Fenton: procesos catalíticos que generan radicales oxidantes mediante la interacción de hierro y peróxidos.

Remediación ambiental: Conjunto de técnicas destinadas a eliminar, transformar o inmovilizar contaminantes en agua, suelo o aire.

Residuos de síntesis: Subproductos generados durante la fabricación de nanomateriales, como sales metálicas, surfactantes o agentes reductores.

Semiconductor: material cuya conductividad eléctrica puede modificarse mediante estímulos externos, fundamental en procesos fotocatalíticos.

Toxicidad dependiente del tamaño: Variación del efecto biológico de una nanopartícula en función de su dimensión, forma o área superficial.

Transformación ambiental: Cambios fisicoquímicos que experimentan los nanomateriales tras su liberación, incluyendo disolución, oxidación o modificación superficial.

Referencias

- Ale, A., Andrade, V. S., Gutiérrez, M. F., Bacchetta, C., Rossi, A. S., Orihuela, P. S., Desimone, M. F., & Cazenave, J. (2023). Nanotechnology-based pesticides: Environmental fate and ecotoxicity. *Toxicol Appl Pharmacol*, 471, 116560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2023.116560>
- Bao, L., Cui, X., & Chen, C. (2023). Toxicology for Nanotechnology. In *Nanomedicine* (pp. 157-177). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8984-0_9
- Beni, A. A., & Jabbari, H. (2022). Nanomaterials for Environmental Applications. *Results in Engineering*, 15, 100467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100467>
- Das, P., Penton, C. R., Westerhoff, P., & Perreault, F. (2023). Prospects of 2D graphene nanomaterials in plant-based agriculture and their fate in terrestrial soil: a critical review. *Environmental Science: Nano*, 10(11), 2936-2956. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3EN00511A>
- Dwivedi, S., Saquib, Q., Ahmad, B., Ansari, S. M., Azam, A., & Musarrat, J. (2018). Toxicogenomics: A new paradigm for nanotoxicity evaluation. In *Cellular and Molecular Toxicology of Nanoparticles* (pp. 143-161). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72041-8_9
- Falciglia, P. P., Gagliano, E., Scandura, P., Bianco, C., Tosco, T., Sethi, R., Varvaro, G., Agostinelli, E., Bongiorno, C., & Russo, A. (2022). Physico-magnetic properties and dynamics of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles (MNPs) under the effect of permanent magnetic fields in contaminated water treatment applications. *Separation and Purification Technology*, 296, 121342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121342>
- G. Mahy, J., D. Lambert, S., Geens, J., Daniel, A., Wicky, D., Archambeau, C., & Heinrichs, B. (2018). Large scale production of photocatalytic TiO₂ coating for volatile organic compound (VOC) air remediation. *AIMS Materials Science*, 5(5), 945-956. DOI: <https://doi.org/10.3934/matricsci.2018.5.945>
- Garbovskiy, Y. (2017). Biological Contamination of Nanoparticles and Its Manifestation in Optical Absorbance Measurements. *Anal Chem*, 89(14), 7282-7285. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b01766>
- Gatou, M.-A., Syrrakou, A., Lagopati, N., & Pavlatou, E. A. (2024). Photocatalytic TiO₂-based nanostructures as a promising material for diverse environmental applications: a review. *Reactions*, 5(1), 135-194. DOI: <https://doi.org/10.3390/reactions5010007>
- Gelaye, Y. (2024). Application of nanotechnology in animal nutrition: Bibliographic review. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2290308. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2290308>
- Gil-Diaz, M., Perez, R. A., Alonso, J., Miguel, E., Diez-Pascual, S., & Lobo, M. C. (2022). Iron nanoparticles to recover a co-contaminated soil with Cr and PCBs. *Sci Rep*, 12(1), 3541. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07558-w>
- Guo, Y. M., Chen, Y. Z., Cao, F. P., Wang, L. J., Wang, Z., & Leng, Y. M. (2017). Hydrothermal synthesis of nitrogen and boron doped carbon quantum dots with yellow-green emission for sensing Cr(VI), anti-counterfeiting and cell imaging. *RSC advances*, 7(76), 48386-48393. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7ra09785a>
- Haghighi, P., & Haghighat, F. (2024). TiO₂-based photocatalytic oxidation process for indoor air VOCs removal: A comprehensive review. *Building and Environment*, 249, 111108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111108>
- Haldar, D., Dinda, D., & Saha, S. K. (2016). High selectivity in water soluble MoS₂ quantum dots for sensing nitro explosives. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(26), 6321-6326. DOI: <https://doi.org/10.1039/c6tc01811d>
- Hendricks, N., Olatunji, O. S., & Gumbi, B. P. (2022). Occurrence and risk assessment of fullerene colloidal nanoparticles by ultrasonic-assisted dispersive liquid-liquid extraction and high-performance liquid chromatography in surface waters. *Heliyon*, 8(11). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11454>
- Huang, X. C., Auffan, M., Eckelman, M. J., Elimelech, M., Kim, J. H., Rose, J., Zuo, K. C., Li, Q. L., & Alvarez, P. J. J. (2024). Trends, risks and opportunities in environmental nanotechnology. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(8), 572-587. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00567-5>
- Ibrahim, R. K., Hayyan, M., AlSaadi, M. A., Hayyan, A., & Ibrahim, S. (2016). Environmental application of nanotechnology: air, soil, and water. *Environ Sci Pollut Res Int*, 23(14), 13754-13788. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6457-z>

- Ike, I. A., Linden, K. G., Orbell, J. D., & Duke, M. (2018). Critical review of the science and sustainability of persulphate advanced oxidation processes. *Chemical Engineering Journal*, 338, 651-669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.034>
- Islam, F. A. S., & Islam, M. A. N. (2025). AI-Driven Integration of Nanotechnology and Green Nanotechnology for Sustainable Energy and Environmental Remediation. *Journal of Engineering Research and Reports*, 27(7), 260-311. DOI: <https://doi.org/10.9734/jerr/2025/v27i71574>
- Kefeni, K. K., Msagati, T. A. M., & Mamba, B. B. (2017). Ferrite nanoparticles: Synthesis, characterisation and applications in electronic device. *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials*, 215, 37-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.11.002>
- Kim, M., Goerzen, D., Jena, P. V., Zeng, E., Pasquali, M., Meidl, R. A., & Heller, D. A. (2024). Human and environmental safety of carbon nanotubes across their life cycle. *Nature Reviews Materials*, 9(1), 63-81. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00611-8>
- Kowalska, J., Biaduń, E., Kińska, K., Gniadek, M., & Krasnodębska-Ostrega, B. (2022). Tracking changes in rhodium nanoparticles in the environment, including their mobility and bioavailability in soil. *Science of the Total Environment*, 806, 151272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151272>
- Kuhn, R., Bryant, I. M., Jensch, R., & Böllmann, J. (2022). Applications of Environmental Nanotechnologies in Remediation, Wastewater Treatment, Drinking Water Treatment, and Agriculture. *Applied Nano*, 3(1), 54-90. DOI: <https://doi.org/10.3390/applnano3010005>
- Le, P. H., Yamashita, S., Cao, K. L. A., Hirano, T., Tsonoji, N., Kautsar, D. B., & Ogi, T. (2023). CO Oxidation Enabled by Three-Way Catalysts Comprising Pd/Rh Nanoparticles Supported on AlO and CeZrO
- Confined in Macroporous Polystyrene Latex Templates. *ACS Applied Nano Materials*, 6(18), 17324-17335. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c03954>
- Li, F., Chen, L., Chen, W., Bao, Y., Zheng, Y., Huang, B., Mu, Q., Wen, D., & Feng, C. (2020). Antibiotics in coastal water and sediments of the East China Sea: Distribution, ecological risk assessment and indicators screening. *Mar Pollut Bull*, 151, 110810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110810>
- Liu, H., Wang, Y., Wang, X., Liu, R., & Zhang, P. (2025). TiO2 Nanoparticles in Soil: Adsorption, Transformation, and Environmental Risks. *Powders*, 4(4), 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/powders4040028>
- Liu, L., Zhang, Q., Gui, J., Zhang, B., Yang, H., Lu, D., Chen, Z., Liu, Q., Li, Z., & Jiang, G. (2022). Traffic-derived magnetite pollution in soils along a highway on the Tibetan Plateau. *Environmental Science: Nano*, 9(2), 621-631. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1EN00886B>
- Liu, Q., Ding, X., Pang, Y., Cao, Y., Lei, J., Wu, J., & Zhang, T. (2022). New insights into the safety assessment of quantum dots: potential release pathways, environmental transformations, and health risks. *Environmental Science: Nano*, 9(9), 3277-3311. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2EN00252C>
- Ma, X., Tian, Y., Yang, R., Wang, H., Allahou, L. W., Chang, J., Williams, G., Knowles, J. C., & Poma, A. (2024). Nanotechnology in healthcare, and its safety and environmental risks. *J Nanobiotechnology*, 22(1), 715. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12951-024-02901-x>
- Mat Lazim, Z., Salmiati, S., Marpongahtun, M., Arman, N. Z., Mohd Haniffah, M. R., Azman, S., Yong, E. L., & Salim, M. R. (2023). Distribution of silver (Ag) and silver nanoparticles (AgNPs) in aquatic environment. *Water*, 15(7), 1349. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15071349>
- Muñoz, R. V., & Saquero, A. H. J. M. N. R. I. e. N. y. N. (2018). Toxicidad de los nanomateriales de interés biomédico en los sistemas biológicos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 11(20), 65-75. DOI: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2018.20.62715>
- Niżnik, Ł., Noga, M., Kobylarz, D., Frydrych, A., Krośniak, A., Kapka-Skrzypczak, L., & Jurowski, K. (2024). Gold nanoparticles (AuNPs)—toxicity, safety and green synthesis: a critical review. *International journal of molecular sciences*, 25(7), 4057. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25074057>
- Oh, E., Delehanty, J. B., Klug, C. A., Susumu, K., Russ Algar, W., Goswami, R., & Medintz, I. L. (2018). Utility of PEGylated dithiolane ligands for direct synthesis of water-soluble Au, Ag, Pt, Pd, Cu and AuPt nanoparticles. *Chem Commun (Camb)*, 54(16), 1956-1959. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7cc08650d>

- Padil, V. V. T., Wacławek, S., Cernik, M., & Varma, R. S. (2018). Tree gum-based renewable materials: Sustainable applications in nanotechnology, biomedical and environmental fields. *Biotechnol Adv*, 36(7), 1984-2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.08.008>
- Prasad, R. D., Prasad, N. R., Prasad, N., Prasad, R. S., Prasad, S. R., Shrivastav, O. P., Prasad, R. B., Prasad, R. A., Prasad, R. G., Saxena, P., Prasad, R. R., Saxena, U. R., Gour, M., Shaikh, Y. I., Ali, M. S., Algadi, H., & Guo, X. (2025). A Review on Aspects of Nanotechnology in Environmental Science and Engineering. *ES General*, 7, 1397. DOI: <https://doi.org/10.30919/esg1397>
- Rajesh, M. V., & Elumalai, K. (2025). Comprehensive Review of Platinum Nanoparticles: Properties, Applications, and Toxicological Considerations. *Biomedical Materials & Devices*, 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00376-4>
- Rosbero, T. M. S., & Camacho, D. H. (2017). Green preparation and characterization of tentacle-like silver/copper nanoparticles for catalytic degradation of toxic chlorpyrifos in water. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(3), 2524-2532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.009>
- Samim, M. (2022). Palladium nanoparticles as emerging pollutants from motor vehicles: An in-depth review on distribution, uptake and toxicological effects in occupational and living environment. *Science of the Total Environment*, 823, 153787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153787>
- Sharma, R., Watanabe, T., & Kumar, A. (2023). Estimation of risk to soil and human health during irrigation using ZnO nanoparticles-containing water. *Journal of environmental chemical engineering*, 11(6), 111230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111230>
- Sielska, A., & Skuza, L. (2025). Copper nanoparticles in aquatic environment: release routes and oxidative stress-mediated mechanisms of toxicity to fish in various life stages and future risks. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(6), 472. DOI: <https://doi.org/10.3390/cimb47060472>
- Tucek, J., Sofer, Z., Bousa, D., Pumera, M., Hola, K., Mala, A., Polakova, K., Havrdova, M., Cepe, K., Tomanec, O., & Zboril, R. (2016). Air-stable superparamagnetic metal nanoparticles entrapped in graphene oxide matrix. *Nat Commun*, 7, 12879. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms12879>
- Usmani, M., Khan, I., Bhat, A., Pillai, R., Ahmad, N., Haafiz, M., & Oves, M. (2017). Current Trend in the Application of Nanoparticles for Waste Water Treatment and Purification: A Review. *Current Organic Synthesis*, 14(2), 206-226. DOI: <https://doi.org/10.2174/1570179413666160928125328>
- Vu, K. A., & Mulligan, C. N. (2023). Remediation of oil-contaminated soil using Fe/Cu nanoparticles and biosurfactants. *Environ Technol*, 44(22), 3446-3458. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2061381>
- Vu, K. A., & Mulligan, C. N. (2023). Remediation of organic contaminated soil by Fe-based nanoparticles and surfactants: a review. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 60-82. DOI: <https://doi.org/10.1080/021622515.2023.2177200>
- Wang, K., Huang, K., Wang, Z., An, G., Zhang, M., Liu, W., Fu, S., Guo, H., Zhang, B., Lian, C., Wu, J., & Wang, L. (2025). Functional Group Engineering of Single-Walled Carbon Nanotubes for Anchoring Copper Nanoparticles Toward Selective CO(2) Electroreduction to C(2) Products. *Small*, 21(21), e2502733. DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.202502733>
- Wang, Q. H., Liang, H. J., Zhou, J. W., Wang, J. K., Ye, Z., Zhao, M., Yang, H. M., Song, Y. H., & Guo, J. J. (2023). Boosting oxygen reduction catalysis by introducing Fe bridging atoms between Pt nanoparticles and N-doped graphene. *Chemical Engineering Journal*, 467, 143482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143482>
- Wei, Y. C., Meng, H., Wu, Q., Bai, X. Y., & Zhang, Y. Q. (2023). TiO₂-Based Photocatalytic Building Material for Air Purification in Sustainable and Low-Carbon Cities: A Review. *Catalysts*, 13(12), 1466. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal13121466>
- Wu, Q., Sun, Y., Luo, Z., Li, X., Wen, Y., Shi, Y., Wu, X., Huang, X., Zhu, Y., & Huang, C. (2024). Application and development of zero-valent iron (ZVI)-based materials for environmental remediation: A scientometric and visualization analysis. *Environmental Research*, 241, 117659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117659>
- Xiang, S., & Tan, M. (2022). Carbon dots derived from natural sources and their biological and environmental impacts. *Environmental Science: Nano*, 9(9), 3206-3225. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2EN00435F>

- Xu, Z., Long, X., Jia, Y., Zhao, D., & Pan, X. (2022). Occurrence, transport, and toxicity of nanomaterials in soil ecosystems: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(6), 3943-3969. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01507-9>
- Youssef, Z., Colombeau, L., Yesmurzayeva, N., Baros, F., Vanderesse, R., Hamieh, T., Toufaily, J., Frochot, C., Roques-Carmes, T., & Acherar, S. (2018). Dye-sensitized nanoparticles for heterogeneous photocatalysis: Cases studies with TiO₂, ZnO, fullerene and graphene for water purification. *Dyes and Pigments*, 159, 49-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.06.002>
- Zabeo, A., Keisler, J. M., Hristozov, D., Marcomini, A., & Linkov, I. (2019). Value of information analysis for assessing risks and benefits of nanotechnology innovation. *Environmental Sciences Europe*, 31(1), 11. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0194-0>
- Zhang, S., Yi, K., Chen, A., Shao, J., Peng, L., & Luo, S. (2022). Toxicity of zero-valent iron nanoparticles to soil organisms and the associated defense mechanisms: a review. *Ecotoxicology*, 31(6), 873-883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02565-z>
- Zhao, L. Q., Yang, S. T., Yilihamu, A., & Wu, D. Y. (2019). Advances in the applications of graphene adsorbents: from water treatment to soil remediation. *Reviews in Inorganic Chemistry*, 39(1), 47-76. DOI: <https://doi.org/10.1515/revic-2018-0020>
- Zhong, D. L., Liu, W. W., Tan, P. F., Zhu, A. Q., Liu, Y., Xiong, X., & Pan, J. (2018). Insights into the synergy effect of anisotropic {001} and {230} facets of BaTiO₃ nanocubes sensitized with CdSe quantum dots for photocatalytic water reduction. *Applied Catalysis B-Environmental*, 227, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.01.009>