

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**CONTAMINACIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS DE METAL EN EL SUELO Y
SUS FUTURAS PERSPECTIVAS**

POR

MARÍA JESÚS CERDA ORMEÑO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2024**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CONTAMINACIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS DE METAL EN EL SUELO Y
SUS FUTURAS PERSPECTIVAS**

POR

MARÍA JESÚS CERDA ORMEÑO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2024**

Aprobada por:

Profesor Asociado, Mauricio Schoebitz
Ing. Agrónomo, Dr.

Guía

Profesor Asociado, Gonzalo Tortella
Ing. Forestal, Dr.
Universidad de la Frontera

Guía Externo

Profesor Asistente, Winfred Espejo
Médico Veterinario, Dr.

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary.....	2
Introducción	2
Desarrollo y discusión	4
Conclusiones	23
Referencias	26
Anexos	29

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1 Procesos que intervienen en la movilización de nanomateriales.....	19
Tabla 1 Clasificación de los NMs de acuerdo con sus dimensiones.....	7
Tabla 2 Principales fuentes de los nanomateriales en el medio ambiente.....	9
Tabla 3 Características y condiciones de los métodos comunes para la síntesis de NPs.....	15

CONTAMINACIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS DE METAL EN EL SUELO Y SUS FUTURAS PERSPECTIVAS

POLLUTION OF METAL NANOPARTICLES IN THE SOIL AND ITS FUTURE PROSPECTS

Palabras clave: agricultura sustentable, ecosistemas, medio ambiente, nanotecnología.

RESUMEN

La matriz ambiental y la rizosfera del suelo se ven alteradas por agentes contaminantes, entre los que se encuentran las nanopartículas (NPs) de metal provenientes de las actividades antropogénicas. Estas NPs metálicas y derivadas del carbono son materiales cuyo tamaño corresponde a la escala atómica y molecular (1-100 nm). En lo que respecta a las actividades agrícolas sostenibles, los estudios relacionados con este tipo de materiales han ido avanzando y se presagia un importante crecimiento en los reportes de resultados de investigación en el área, debido a la posibilidad de incrementar su uso, tanto a nivel agroindustrial, como en la producción de alimentos y el desarrollo de técnicas amigables con la preservación y conservación del medio ambiente. A pesar de los efectos benéficos que genera el uso de las NPs en la preservación del equilibrio del medio ambiente, como p.ej. el desarrollo de pesticidas más específicos o la remediación de los suelos; aún continúa la preocupación sobre los efectos colaterales asociados con el mal uso y el destino final de las NPs en el ambiente. Por ello, se realiza la presente investigación bibliográfica con el objetivo de dar a conocer y evaluar la información relacionada con los efectos de las NPs y su interacción con los agro-ecosistemas, para así describir cuál es la procedencia de la contaminación por NPs, las posibles consecuencias y los daños que provocan a nivel de suelo, microbiota y plantas.

SUMMARY

Polluting agents alter the environmental matrix and soil rhizosphere, including metal nanoparticles from anthropogenic activities. These metallic and carbon-derived NPs are materials whose sizes correspond to atomic and molecular scale (1-100 nm). Regarding sustainable agricultural activities, studies related to this type of material have been advancing, and an important growth is predicted in the reports of research results in the area, due to the possibility of increasing their use, both in industrial agriculture, such as food production, and the development of friendly techniques with the preservation and conservation of the environment. Although the beneficial effects of the use of nanoparticles in preserving the balance of the environment are evident, such as the development of more pesticides that are specific to soil remediation, there is still concern about the collateral effects associated with misuse and the consequent final fate of NPs in the environment. In this sense, the present bibliographic research is carried out with the objective of identifying and evaluating the information related to the effects of NPs and their interaction with agro-ecosystems to describe the origin of contamination by NPs. Possible consequences and damage at the soil, microbiota, and plant levels.

INTRODUCCIÓN

La contaminación es un fenómeno que ha venido afectando al medio ambiente desde hace décadas, pero que se ha ido incrementando con el crecimiento poblacional y el desarrollo industrial. En efecto, la contaminación ambiental es uno de los grandes problemas que enfrenta la humanidad en la actualidad, y se ha extendido con mayor rapidez en los últimos años, por lo que el planeta Tierra está sufriendo un marcado deterioro producto de diferentes factores bióticos y abióticos (Juliño *et al.*, 2021). Las zonas urbanas, industriales y rurales son generadoras de grandes cantidades de desechos, así como contaminantes de diferentes tipos y variables grados de peligrosidad, producto de procesos físicos, químicos o biológicos que vierten componentes nocivos al medio ambiente y que afectan la salud de todos los seres vivos.

Dentro de la cotidianidad del ser humano existen productos que se utilizan y consumen con frecuencia sin conocer exactamente su composición, como medicamentos, alimentos, cosméticos, pinturas, pesticidas, entre otros; incluso sin tener conocimientos de sus reales implicaciones en el ambiente. En la actualidad, la mayoría de estos productos contienen NPs o nanomateriales que se incorporan al medio ambiente de forma directa o indirecta, sobre todo al suelo, donde ocasionan efectos de diferente índole y escala, muchas veces sin considerar su grado de afectación (Luqueño, 2019).

Las NPs son cuerpos de tamaño nanométrico, por lo que sus dimensiones son de pocos nanómetros, teniendo en cuenta que un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro o la millonésima parte de un milímetro. Las NPs constituyen una amenaza poco estimada, pero potencialmente significativa para el medio ambiente y la salud humana, ya que cuentan con reactividad y propiedades específicas dependiendo del tamaño, que no son frecuentes en los demás contaminantes de mayor tamaño. Comúnmente, el riesgo que representan las NPs para el entorno está relacionado con su toxicidad y biodisponibilidad (Lohse, 2018).

Sin embargo, el uso adecuado y eficiente de las NPs puede resultar de beneficio para el ambiente. Tal es el caso del empleo de la nanotecnología para la remediación del daño ocasionado por la contaminación de los suelos y de esta manera contribuir con prácticas agrícolas sostenibles.

En este sentido, la presente monografía tiene como objetivo realizar un análisis bibliográfico sobre los efectos de las NPs metálicas en los agroecosistemas, describiendo su procedencia, posibles consecuencias y los daños que provocan a nivel de suelo, microbiota y plantas. Los objetivos específicos de este estudio son:

- 1) Identificar las fuentes y vías de liberación de las nanopartículas al medio ambiente.
- 2) Describir las preocupaciones y riesgos asociados con el uso de NPs en la agricultura moderna.
- 3) Señalar los beneficios potenciales del uso de NPs de origen metálico.
- 4) Proponer estrategias para la gestión y regulación de las NPs en el medio ambiente.

El proceso de revisión bibliográfica se llevó a cabo conforme a los siguientes criterios:

1) tipo de publicación: como artículos de investigación, revisiones literarias, informes técnicos y tesis.

2) año de publicación: artículos publicados en los últimos cinco años (2019 - 2024) para obtener información actualizada.

3) temática: tales como los efectos de nanopartículas metálicas en agroecosistemas, la contaminación del suelo por nanopartículas, las interacciones entre nanopartículas y microbiota del suelo y el impacto en la salud de las plantas.

4) palabras claves: "Nanoparticles heavy metals soil contamination", "Environmental impact of metal nanoparticles", "Soil contamination nanotechnology", "Metal nanoparticles agriculture", "Effects of metallic nanoparticles on soil microbiota", "Toxicity of metal nanoparticles to plants"

5) Efectos específicos: Tales como la toxicidad de nanopartículas en organismos del suelo, cambios en la composición y diversidad de la microbiota del suelo y efectos en el crecimiento y desarrollo de plantas.

En donde como estrategia de búsqueda se utilizaron estos criterios y palabras claves, ya sean combinando palabras claves, utilizando filtros de búsqueda o consultando diferentes sitios web, con el propósito de encontrar artículos de alta calidad sobre la contaminación por NPs de metales pesados en el suelo para el desarrollo de esta monografía.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Contaminación de las nanopartículas de metal en el suelo y sus futuras perspectivas

Las NPs que constituyen la materia pueden ser clasificadas de acuerdo con su tamaño. Las más gruesas abarcan un intervalo de entre 10.000 y 2.500 nm, mientras que las más finas entre 2.500 y 100 nm. A mediados de los años 70's del siglo XX eran conocidas como partículas ultrafinas (UFP). Posteriormente se les añadió el prefijo "nano", derivado del latín "nanus", que significa "enano" y a nivel

métrico expresa una millonésima parte de una unidad (1×10^{-9}). Por consiguiente, un nanomaterial es aquel que posee ciertas características estructurales, entre las cuales se encuentra que una de sus dimensiones esté en el intervalo de 1-100 nanómetros (Lionello, 2018).

En la actualidad, el uso inadecuado de las NPs puede afectar la flora y fauna del suelo de manera directa induciendo cambios en la biodisponibilidad de otros nutrientes y toxinas, o de manera indirectamente por medio de las interacciones con compuestos orgánicos y posibles interacciones con compuestos orgánicos tóxicos, los que podrían aumentar o disminuir la toxicidad de las NPs (Haris y Ahmad, 2017).

Conceptos básicos

Las NPs son estructuras de tamaño inferior a 100 nanómetros (1×10^{-7}), las cuales pueden ser sintetizadas partiendo de diferentes materiales, en particular metales. Para su visualización se requiere el uso de un microscopio de alta resolución, como el microscopio electrónico de transmisión (TEM) o en microscopio electrónico de barrido (SEM).

Por su parte, los nanomateriales (NMs) son aquellas sustancias o combinación de sustancias en la escala manométrica, en que los constituyentes son átomos y/o moléculas. La composición química de los NMs es distintiva, como el caso de los puntos cuánticos de selenio de cadmio (CdSe), los nanotubos de carbono funcionales de variados compuestos, los silicatos manejados con acrilato y organosilano, los nano-resortes de sílice, los nanosprings™, entre otros. Debido a su composición, además de su elevada reactividad a escala nanométrica, constituyen un gran riesgo para la seguridad cuando interactúan con los seres vivos y el medio ambiente (Lizarazo *et al.*, 2018).

En cuanto a la nanotecnología, se define como la disciplina encargada del estudio, análisis, diseño, manejo y aplicación de equipos, productos y sistemas funcionales, a través del control de las partículas a nano-escala (Gómez, 2018).

De esta manera, la nanotecnología es la encargada de comprender los procesos implicados en la obtención de NMs e interpretar el resultado de sus investigaciones en bienes y servicios que permitan facilitar la calidad de vida de las personas proporcionando herramientas tecnológicas innovadoras que sobrepasen las

funciones de las actuales. Es así como esta nueva tecnología ha permitido el desarrollo de NMs que pueden ser utilizados en diversas áreas, como la biomedicina, agricultura, microelectrónica, industria farmacéutica, textil, biotecnología, química, energías alternativas, entre otras (Corpus *et al.*, 2023).

Origen y fuentes de las nanopartículas

En la actualidad, las NPs inorgánicas obtenidas en laboratorios a partir de Fe, Cu, Zn, Ag, entre otros elementos, son producidas para su aplicación en diferentes productos básicos de consumo, como cosméticos, productos industriales y agropecuarios, medicamentos o dispositivos electrónicos, de uso habitual por los consumidores. A su vez, estas NPs también se pueden encontrar de manera natural en el agua, el suelo y el aire (Aguilar *et al.*, 2022).

Las NPs poseen propiedades que difieren de forma significativa de las otras partículas de mayor tamaño; por lo que dichas propiedades dependen del tamaño, forma y composición química de las NPs. Por esta razón, el desarrollo y producción de las NPs inorgánicas va a depender del tipo de su uso y aplicación, los cuales son considerados como sintéticos. A pesar de estos, las NPs inorgánicas pueden ser obtenidas de procesos naturales, es decir, sin la intervención del ser humano.

En la naturaleza suceden diferentes procesos que conducen a la formación de NPs. Tal es el caso de las erupciones volcánicas, la erosión del suelo y las rocas, el polvo cósmico, los microorganismos y los incendios forestales, entre otros. Por ejemplo, la formación de NPs a partir de las erupciones volcánicas, las cuales pueden llegar a alcanzar temperaturas superiores a los 1.000 °C. Las nubes de cenizas volcánicas generadas por los volcanes contienen una gran variedad de NPs que por lo general están formadas por hierro y silicatos, y tienen un tamaño que ronda los 100-200 nm. En el caso de los incendios forestales, las NPs generadas son las conocidas como “Nanotubos de Carbono”, recolectadas de la quema de madera y con tamaño promedio de 15-70 nm (Aguilar *et al.*, 2022).

En el caso de los sistemas biológicos, las NPs son generadas a partir de seres vivos como plantas, microorganismos, virus o bacterias. En el caso de las algas, las diatomeas que habitan ambientes marinos son algas unicelulares fotosintéticas que absorben el silicio del medio ambiente y lo acumulan en sus paredes celulares

formando nanoestructuras homogéneas, porosas y espaciadas, denominadas frústulas (Aguilar *et al.*, 2022).

Tipos de nanomateriales

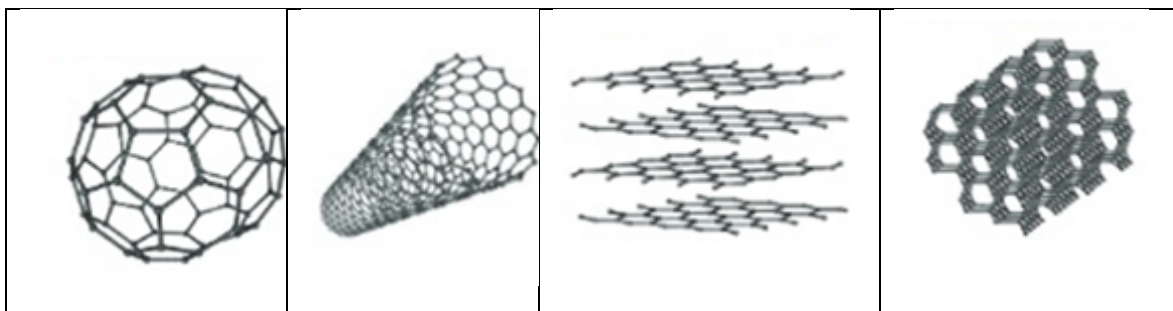
De acuerdo con la Agencia del Medioambiente (EE. UU.), los NMs pueden ser clasificados en base al tipo de material de la siguiente forma:

1. Los NMs basados en carbono que presentan forma esférica o elipsoidal son conocidos como fullerenos, mientras que los de forma cilíndrica son denominados nanotubos.
2. Los NMs basados en metales comprenden los puntos cuánticos, las NPs de oro y plata, así como los óxidos metálicos, p.ej. dióxido de titanio.
3. Los dendrímeros son aquellos polímeros de tamaño nanométrico obtenidos a partir de unidades ramificadas, presentan una superficie con abundantes extremos de cadena y cavidades interiores que pueden alojar otras moléculas, como los fármacos.

Los compuestos que combinan NPs con otros materiales de tamaño superior. P. ej. algunas NPs como las arcillas a nano-escala son utilizadas como componentes de piezas de automóviles o de materiales de empaque, con la finalidad de mejorar sus propiedades térmicas, mecánicas y protectoras (Gómez, 2018) (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de los nanomateriales de acuerdo con sus dimensiones.

0D	1D	2D	3D
- Fullerenos	- Nanocables y nanofibras	- Monocapas	- Materiales nanoestructurales
- Partículas coloidales	- Nanotubos	- Nanorrecubrimientos	- Policristales
- Puntos cuánticos (Qdots)	- Nanovarillas	- Películas poliméricas (nano)	- Nanobolas
- Nanopartículas de Au y Ag	- Fibras poliméricas	- Películas multicapa	- Nanobobinas
		- Superficies espesor <100nm	- Nanoflores



Fuente: Adaptado de Gómez, 2018.

Fuentes de nanopartículas al medio ambiente

La emisión de NPs puede ser directamente al medioambiente o de manera indirecta mediante un sistema operativo técnico, como las plantas de tratamiento de aguas residuales (WWTPs) o vertederos. Las emisiones indirectas pueden ser debido a los efluentes de WWTPs, la aplicación de biosólidos al suelo o lixiviados de vertederos. De todas formas, la presencia natural de las NPs en la atmósfera es baja en comparación con los niveles causados por procesos de combustión, vehículos con combustibles diésel o gasolina y fuentes de combustión estacionarias, los cuales llevan muchos años contribuyendo a la presencia de materiales particulados en la atmósfera, incluyendo NPs.

Las NPs diseñadas (ENPs) son liberadas al aire y la atmósfera ambiental, ya sea desde fuentes puntuales o no puntuales durante todo el ciclo de vida de productos nano-habilitados. Las fuentes de ENPs puntuales son instalaciones de manufactura, procesos de transportes, plantas de tratamiento de aguas residuales (WWTPs), quema de residuos y vertederos. Como otros contaminantes, las fuentes no puntuales de ENPs son procesos de abrasión o lavado, tales como pinturas, prendas textiles, productos de cuidado personal, agentes de limpieza, entre otros (Peng *et al.*, 2017). (Tabla 2).

Estudios recientes han señalado que una pequeña cantidad de ENPs es emitida a la atmósfera en una escala global anual de aproximadamente 8.100 toneladas métricas con relación a otros compartimentos ambientales como el suelo y el agua. Aunque esta pequeña cantidad de ENPs tiene un tiempo de residencia más bien corto en la atmósfera, su destino atmosférico y transporte no deben pasarse por alto (John *et al.*, 2017). En el caso de escenarios de emisión localizada como liberación

accidental y aerosolización de pesticidas, se emite temporalmente un alto contenido de ENPs hacia la atmósfera. Tras la liberación de ENPs hacia la atmósfera, estas sufren alteraciones físicas y transformaciones químicas, tanto en ambientes acuáticos como también terrestres.

Los productos basados en ENPs son utilizados en cada campo de la vida diaria, incluyendo electrodomésticos, productos de cuidado personal, biomédicos, entre otros, debido a sus características físico-químicas, propiedades ópticas y eléctricas sobresalientes, respecto a sus contrapartes a escala mayor (no NP) (Lien *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019). Por lo tanto, el uso extensivo de productos nano-habilitados provoca la liberación de ENPs al medio ambiente, intencional y no intencionalmente en cada etapa del ciclo de vida de los productos, p.ej. en los procesos de producción de ENPs, en la incorporación en productos nano-habilitados y el uso de productos ENPs, así como en la fase final del ciclo de vida.

Tabla 2. Principales fuentes de los nanomateriales en el medio ambiente.

	Origen natural	Origen incidental	Nanopartículas diseñadas
Aire	Erupción Volcánica Sistemas de ventilación hidrotermal Desgaste fisicoquímico de rocas y volatilización del polvo Procesos biológicos Degradación UV de los sistemas acuáticos Procesos de nucleación	Procesos de combustión Emisiones industriales	Procesos de producción de nanotecnología
Agua	Nanoclusters de sulfuro metálico Hierro hidratado Óxido de manganeso	Deposición de la atmósfera	Derrame de nanotecnología

Suelo	Nanominerales (ej. Ferrihidrita)	Deposición de la atmósfera	Derrame de nanotecnología
	Agregados de materia orgánica natural	Sorción y transporte de sistemas acuáticos	
	Origen biogénico		

Fuente: Adaptada de Farré *et al.*, 2011.

En el caso de textiles nano-habilitados, cubiertas de piso y pinturas para protección UV, muchas de las ENPs (Ag, TiO₂, y ZnO) son liberadas al medioambiente durante la fase de uso de nano-productos. Por otro lado, las basadas en carbono y otras ENPs tienen fuerte afinidad de adsorción por los contaminantes orgánicos e inorgánicos existentes en el medioambiente de forma natural. Así, la interacción de ENPs con estos contaminantes puede alterar su transporte y reactividad. La liberación intencional y no intencional de ENPs en el medioambiente natural representa una amenaza para los humanos y otros organismos (Abbas *et al.*, 2019; Sendra *et al.*, 2019).

Características de los NMs:

A continuación, se presenta la definición de los comportamientos y propiedades que han sido identificados como propiedades diferenciales de los NMs:

- **Tamaño:** un nanomaterial se ubica en un rango entre 1 y 100 nanómetros (1 nanómetro equivale a 10⁻⁹ metros).
- **Distribución del tamaño:** se fundamenta en la cohesión cercana a la mediana o media del tamaño, y no en la concentración de la masa.
- **Área superficial por volumen específico (VSSA):** un nanomaterial presenta un VSSA inferior a 60 m²/cm³, aunque para VSSA menores es factible que una fracción esté por encima de 60 m²/cm³.
- **Características físico-químicas:** por lo general presentan una fase cristalina, cristalinidad y pequeñas estructuras, potencial redox, fotocatalisis, potencial para la formación de radicales, potencial Zeta, solubilidad en agua, coeficiente de partición-octanol/agua.

- Diferencias entre agregados y aglomerados: los agregados están formados a partir de NPs primarias que poseen fuertes enlaces entre sí, mientras que los aglomerados se forman a partir de materiales de mayor tamaño, siendo de estructura más frágil.
- Características orgánicas e inorgánicas: en el caso de los NMs orgánicos, denominados “suaves” o “blandos”, son biodegradables y no biopersistentes. Por su parte, los NMs artificiales denominados “duros”, son inorgánicos e insolubles, no son biodegradables y son potencialmente biopersistentes.
- Persistencia: se trata de la capacidad relacionada con la duración o existencia del material o sustancia química, por lo que es considerada como lo opuesto de la solubilidad o biodegradación (Lizarazo *et al.*, 2018).

Aplicaciones de los NMs y la Nanotecnología en la Industria

De acuerdo con Lizarazo *et al.*, (2018), se presumía que para el 2018 la nanotecnología se incorporara en más del 15 % de los procesos de manufactura industrial, hasta alcanzar la cifra récord de negocios alrededor de los 2,6 trillones de dólares. En efecto, la aplicación de la nanotecnología en diversas áreas industriales a nivel global ha favorecido el aumento en el empleo de NMs manufacturados, entre los que destaca la industria de la construcción, metalmecánica, agroindustrial, cosméticos y revestimientos. En la actualidad, el uso de NMs supone la proliferación de productos de consumo más resistentes, limpios, de menor costo, mayor precisión, más eficaces, obtenidos mediante energías de producción limpias (Lizarazo *et al.*, 2018).

En 2021, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), confirmó una base de datos de NMs manufacturados con la finalidad de evaluar y promover trabajos de investigaciones relacionados con el impacto del uso de NMs sobre aspectos ambientales, de salud humana y seguridad alimenticia. Donde se registran una serie de NMs que en la actualidad son utilizados a nivel comercial, así como aquellos que están siendo producidos de manera significativa para las labores de investigación y aplicación a nivel industrial (OCDE, 2021).

De igual forma, una reciente base de datos sobre materiales de consumo que incorporan la nanotecnología señala que cerca de 1.814 NMs son manufacturados

por 622 industrias en 32 países. De estos productos, cerca del 47 % registra la incorporación de por lo menos un nanomaterial en su composición, siendo la mayoría de ellos (42 %) productos ubicados en la categoría de salud y belleza. En cuanto a la incidencia, el nanomaterial más utilizado a nivel industrial son las NPs de plata (24 %), cifra que en muchos casos no cubre las expectativas, ya que muchos de los productos revisados (49 %) no reportan el tipo de NMs incorporados en su composición. Por su parte, la empresa Nanowerk Nanomaterial Database™ encargada del registro y libre acceso para la comunidad de la nanotecnología, señala 2.515 NMs inscritos, siendo el 52.7 % NPs, 29,9 % nanotubos, 8,2 % grafenos y fullerenos, 4,3 % quantum dots, 3 % nanoalambres y 1,9 % nano-fibras (Nanowerk, 2017).

En relación con la legislación sobre la producción y uso de NMs, en países como los Estados Unidos, son instituciones como la Agencia de Protección Ambiental (EPA) o la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) las encargadas de establecer normas y regulaciones acerca del desarrollo y manejo de NMs, con la finalidad de asegurar cualquier tipo de riesgo para la salud humana y el medio ambiente. De forma similar, en la Unión Europea es la Agencia Europea de Químicos (ECHA), el Reglamento de la Unión Europea para protección de la Salud Humana (REACH) y el Reglamento sobre Clasificación, Etiquetado y Envasado (CLP), los encargados de registrar los agentes químicos y el manejo general de riesgos de seguridad a agentes tóxico (EPA, 2023; FDA, 2018).

Retos para la Salud, Seguridad y Protección Ambiental

Los riesgos para la salud, seguridad y protección ambiental del uso de NMs o NPs están relacionados con la presencia de partículas “libres” nocivas o tóxicas que pueden ingresar al organismo por diferentes vías o por medio de vectores ambientales, como son el agua, aire o suelo. Por lo general, muchos productos comerciales de uso frecuente a nivel industrial o doméstico contienen partículas nanoscópicas diluidas en su matriz inestable, lo que representa un factor de riesgo, especialmente relacionada con su grado de reactividad y nivel de toxicidad, llegando incluso a penetrar la barrera sangre-cerebro (Lizarazo *et al.*, 2018).

El desarrollo de productos que contienen en su estructura componentes nanoestructurales refiere que muchas veces las empresas no brindan la información adecuada a los usuarios para que les permita decidir sobre el empleo de un determinado compuesto nanomaterial para así establecer las condiciones de riesgo a la salud y seguridad. De hecho, la exposición continuada de NPs puede generar un efecto negativo en diversos órganos en seres humanos y su acumulación ambiental, provocando serios daños a organismos y plantas (Navarro *et al.*, 2021).

Por otra parte, los NMs son expuestos a diferentes ambientes cuando son utilizados a nivel industrial o doméstico, por lo que pueden sufrir cambios drásticos que dificultan la predicción de su comportamiento en el tiempo y el entorno donde son utilizados (Lizarazo *et al.*, 2018).

Síntesis de las nanopartículas

La síntesis de las NPs se refiere al conjunto de operaciones y procedimientos ejecutados mediante un protocolo que se debe realizar en laboratorio para la obtención de NPs de alta pureza y cristalinidad, los cuales han sido diseñados y elaborados en base a la experiencia práctica y los resultados obtenidos de diferentes trabajos investigativos (Borja y Rojas, 2020).

Según su procedencia, las NPs se clasifican en origen natural, las producidas por árboles, plantas, volcanes o especies marinas. Las incidentales cuando proceden de la combustión en vehículos y en procesos industriales. Siendo las más comunes las de origen artificial, elaborados a partir de dos procesos de fabricación: descendentes/ascendentes (Gómez, 2018).

Las técnicas descendentes (Top Down Approach): consisten en la división de material macroscópico o grupo de materiales sólidos hasta llegar al tamaño nanométrico adecuado. Se utilizan los métodos físicos como la molienda o el desgaste, los métodos químicos y la volatilización de un sólido seguido por la condensación de los componentes volatilizados. Un ejemplo, es la técnica de fotolitografía utilizada por la industria de los semiconductores para crear circuitos integrados (Gómez, 2018).

Las técnicas ascendentes (Bottom-Up Approach): consisten en la fabricación de NPs con capacidad de auto-ensamblarse o auto-organizarse por medio de la

condensación de átomos o entidades moleculares en una fase gaseosa o en solución. El proceso consiste en sintetizar moléculas de manera espontánea que se auto-ensamblan sobre el cambio controlado de un disparador químico o físico específico, como un cambio en el pH, la concentración de un soluto específico o la aplicación de un campo eléctrico (Gómez, 2018).

Según Borja y Rojas (2020), se comprende método sintético cuando sus procesos abarcan procedimientos y reacciones químicas controladas. Entre los métodos sintéticos más comunes utilizados para la producción de NPs se encuentran los siguientes:

Tabla 2. Características y condiciones de los métodos más comunes para la síntesis de NPs.

Método	Descripción	Condiciones
Método Sol-gel	Utilizado para la preparación de zeolitas, emplea una solución acuosa en conjunto con tratamiento hidrotérmico.	Temperatura: Ambiente - 300 °C.
Método sólido	Reacción en fase sólida donde subunidades químicas similares forman secuencias de moléculas. Utilizado en síntesis en paralelo y controladas en tiempo real.	-
Método Hidrotérmico	Síntesis en medios cerrados con temperaturas y presión controladas, mejora la regularidad y uniformidad de los nanomateriales regulando su morfología, tamaño y valencia.	Temperatura: 80 - 130 °C.
Método Solvo-térmico	Proceso en medios acuosos u orgánicos a bajas temperaturas y presiones generadas por el medio,	Temperatura: 250 °C en promedio.

	obteniendo nanocristales monodispersos con alta superficie específica.	
Método de oxidación directa	Reacciones ligeramente exotérmicas en pequeños reactores, proceso rápido con tiempos superficiales de contacto muy breves.	Tiempo de contacto: 10^{-2} s o menos
Método de deposición química de vapor (CVD)	Método controlado para obtener nanomateriales a base de carbono con alta cristalinidad y pureza.	Temperatura desde los 100-500 °C.
Método de deposición física de vapor (PVD)	Utiliza presión atmosférica, requiere altas temperaturas para formar óxidos con alta pureza y cristalinidad.	Temperatura: 600 - 850 °C
Método de electrodeposición	Deposición química o electrodeposición para desarrollar materiales conductores eléctricos, sintetiza NPs con amplia área superficial alta cristalinidad y pureza, elevada capacidad específica.	-
Tratamiento de microondas	Reacciones orgánicas en recipientes de teflón en hornos microonda bajo reflujó controlado, requiere condiciones extremas y genera residuos químicos.	Temperatura: >200 °C
Técnica de síntesis verde	Utiliza funciones naturales de plantas para extraer metales pesados de suelos contaminados, reemplaza agentes químicos por biológicos como algas, plantas, hongos, entre otros.	-

Fuente: Adaptada de Borja y Rojas, 2020.

Aplicaciones de diversas nanopartículas en la Agricultura.

Los agricultores enfrentan actualmente desafíos como el estancamiento de la productividad de los cultivos, la baja efectividad de los nutrientes, la reducción de la materia orgánica en el suelo, la erosión de los suelos, el déficit hídrico en las zonas agrícolas y el cambio climático (Lira *et al.*, 2017).

En la agricultura, la aplicación de la nanotecnología y el uso de NPs ofrece la oportunidad de mejorar la productividad y el rendimiento agrícola a través de diferentes estrategias que permitan incrementar la producción de alimentos mediante el empleo de una menor cantidad de energía y reduciendo los costos de producción y los residuos de pesticidas o agroquímicos. De igual forma, permite el desarrollo de nuevas herramientas moleculares y celulares para la prevención, control y tratamiento de las enfermedades en las plantas, además del desarrollo de sistemas inteligentes que faciliten el tratamiento a nano-escala que transporte, dirija e incorpore con precisión sustancias terapéuticas como insecticidas, fungicidas, herbicidas, antibióticos o viricidas (Castro, 2021).

Para conllevar los graves problemas que enfrenta la producción agrícola, la nanotecnología cuenta con las herramientas necesarias para la elaboración de nanopesticidas encapsulados para su liberación, la producción de macro y micronutrientes a nivel nano o el desarrollo de diversos tipos de NMs en contenedores de alimentos. Así como el diseño de nano sensores que permitan fijar, detectar y disponer la cantidad adecuada de nutrientes y plaguicidas para promover la productividad sustentable de las NPs, con lo que se busca hacer más eficiente y sustentable la actividad agrícola (Lira *et al.*, 2018).

Biotransformación de las nanopartículas en el suelo.

El suelo es uno de los componentes menos dinámico de la biosfera, por lo que cuenta con un potencial relativamente alto de contaminantes, en comparación con la atmósfera y la hidrosfera. El suelo no actúa solo como depósito de contaminantes, sino que sirve como fuente de entrada de contaminantes a las cadenas alimentarias. Además, se considera que la matriz del suelo contiene abundantes cantidades de NPs naturales que existen en ambas formas; como partículas primarias y como aglomerados/agregados (Rajput *et al.*, 2019).

La materia orgánica natural del suelo influye en la biodisponibilidad de las NPs, mediante una variedad de mecanismos que incluyen las interacciones electrostáticas, intercambio de elementos asociados, efectos hidrofóbicos, enlaces de hidrógeno y compilación. En el suelo, las NPs pasan por una serie de procesos como la homo/hetero-agregación, la oxidación, disolución, sulfuración y sedimentación, procesos que de manera global pueden afectar la toxicidad de las NPs. La agregación y disolución de las NPs generalmente está afectada por una variedad de factores ambientales como el pH, la materia orgánica y los niveles iónicos, especies y coloides presentes en el suelo (Gogos *et al.*, 2017).

Un ejemplo, es el proceso de pasivación que ocurre usualmente bajo diversas condiciones ambientales en la sulfuración de CuO-NP, donde se espera que el proceso altere significativamente la especiación y propiedades de CuO-NP, lo que podría incrementar su solubilidad aparente, dando como resultado una mejor biodisponibilidad y, por tanto, una ecotoxicidad atribuida al Cu²⁺ tóxico. En el suelo, la biodisponibilidad y la toxicidad que pueden llegar a generar las NPs está ligada a las características del estado en que se encuentre el metal como su complejización y el estado de oxidación, entre otros. Por otro parte, también influyen factores ambientales como el índice de pH, el potencial redox, la textura y tipo de suelos, las especies de fauna y flora, y sus estados fenológicos (Zhang *et al.*, 2018).

Interacción de las nanopartículas con organismos del suelo

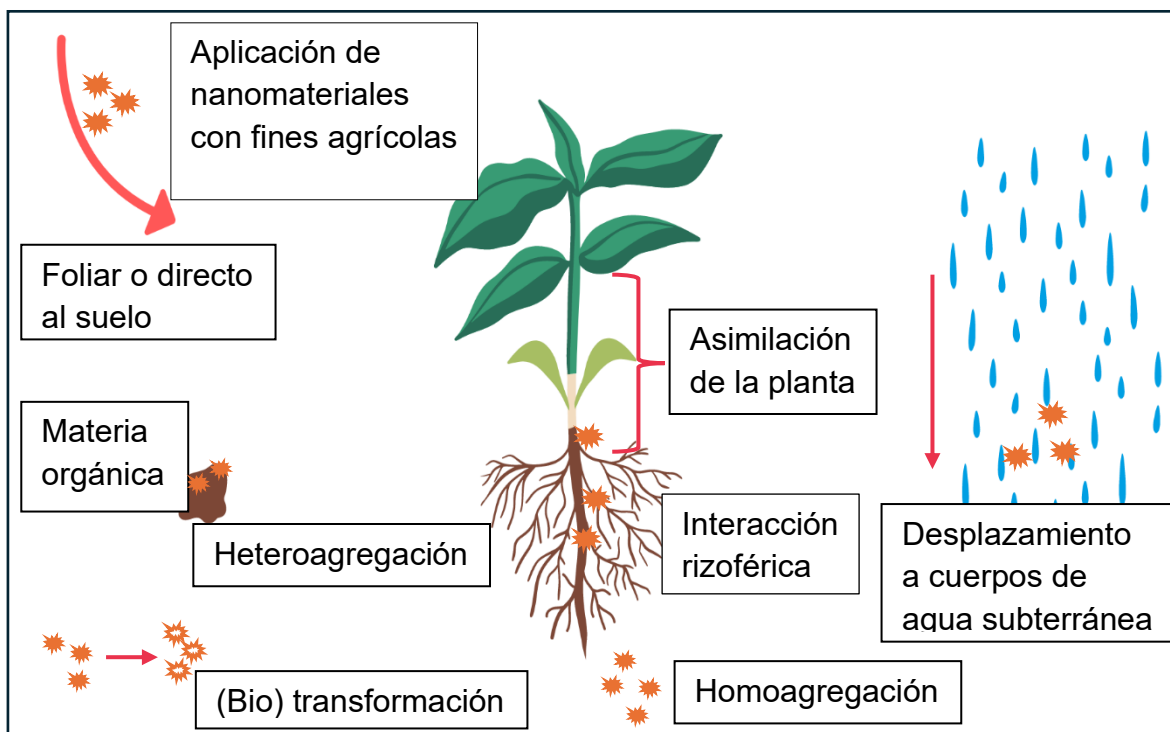
Las NPs generan un impacto negativo relacionado con la capacidad para acumularse en los organismos y producirles daños. De forma natural, los organismos del suelo están expuestos a NMs, pero esto no significa que sean inocuos, ya que pueden tener un efecto tóxico bajo ciertas circunstancias. A pesar de que las NPs de origen natural se pueden unir de manera normal con los organismos del suelo para formar partículas de mayor tamaño, las de origen artificial tienden a persistir en el medio por el uso de surfactantes y estabilizadores (Villamor, 2020).

Las NPs se encuentran en la fracción del suelo de entre 2⁻⁵³ y <2 μm, por lo que están en contacto directo con las comunidades microbianas. La toxicidad de las NPs y su efecto sobre la actividad microbiana es variable, por lo que depende de su

naturaleza, como p.ej. los de tipo inorgánico (óxidos metálicos y metales) tienen un mayor potencial tóxico que los de naturaleza orgánica (fullerenos y nanotubos de carbono). Algunas bacterias Gram (-) son menos sensibles a NPs que las bacterias Gram (+), debido a la estructura de la membrana celular, tal es el caso de las NPs de Ag, las cuales han mostrado ser más tóxicas para bacterias Gram (+) (Vázquez, 2023).

Los microorganismos del suelo son excelentes indicadores de la calidad de suelo, siendo afectados por la calidad de la materia orgánica y el reciclaje de los nutrientes. Por lo general, los microorganismos del suelo absorben las NPs a través de la superficie celular, mientras que en organismos más complejos la absorción se produce comúnmente a través del sistema respiratorio, el sistema gastrointestinal o la piel. Las NPs se pueden trasladar fácilmente entre diferentes tejidos y luego trasladarse al sistema circulatorio, y consecuentemente, hacia otros órganos. La toxicidad de las NPs depende de varios factores, entre ellos su persistencia en los órganos y la respuesta biológica de los organismos, cuyos efectos ocasionan la aparición de estrés oxidativo en células y tejidos vivos, así como la apoptosis celular o presencia de daños en el ARN o el ADN. Algunos estudios señalan efectos genotóxicos debido a la exposición a las NPs de óxido de cerio (IV), plata, carbono, dióxido de titanio, óxido de zinc, dióxido de silicio amorfo (silica amorfa), Sulfato de cobre (II), entre otros (Navarro *et al.*, 2021).

Figura 1. Procesos que intervienen en la movilización de NMs de uso agrícola en suelo y agua.



Fuente: Vázquez, 2023.

Absorción y bioacumulación de las nanopartículas en plantas

Las NPs afectan el desarrollo y crecimiento de las plantas, como el caso de la acumulación de Al_2O_3 y TiO_2 que reduce el crecimiento de las raíces. Además, las NPs de TiO_2 disminuyen la conductividad hidráulica, lo que inhibe el crecimiento de las hojas. Por otra parte, plantas expuestas a las NPs de CeO_2 manifestaron una respuesta negativa en crecimiento y la actividad fisiológica. En algunos casos, las NPs más pequeñas que el diámetro de las aberturas de las estomas ($10\text{-}50\ \mu\text{m}$) provoca efectos negativos, ya que ingresan directamente a la cavidad subestomática causando su obstrucción, por lo que ocurre la disminución del crecimiento y los procesos fotosintéticos, así como la reducción de la biomasa de los cultivos (Navarro *et al.*, 2021).

La acumulación de NPs puede alterar distintos procesos fisiológicos en las plantas y afectar la organización de los orgánulos celulares y sub-celulares, modificar el contenido de las proteínas, ácidos nucleicos y lípidos a través de la generación de radicales hidroxilos (Rajput *et al.*, 2019). La tasa de acumulación de las NPs por parte de las raíces de las plantas se ve afectada por las propiedades de las NPs, así como por las condiciones ambientales. Uno de los mecanismos para

la biodisponibilidad aumentada de NPs en la rizósfera es la aparición de sideróforos microbianos y exudados de la raíz. Se sabe que las plantas y microorganismos producen ligandos orgánicos para la solubilización de minerales desde fuentes inadecuadamente disponibles (Chen, 2018).

Contaminación de suelos por nanopartículas

Recientemente, las NPs metálicas fueron clasificadas por la Agencia de Control Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, como un tipo de contaminante emergente (CE), debido al creciente número de productos fabricados con materiales que contienen NPs a nivel industrial y agroindustrial, así como al uso masivo en todo el planeta, lo que constituye un riesgo por el desconocimiento de cuáles son los verdaderos efectos negativos de utilizar productos que contengan NPs y su posterior liberación en el medio ambiente (López y Guzmán, 2021).

Después de sobrellevar distintos fenómenos de transporte, dispersión y aplicación por distintos medios, las NPs se tienden a depositar y acumular en los ecosistemas acuáticos y terrestres afectando de distintas formas a la flora y la fauna. Algunas condiciones del suelo, como el pH, fuerza iónica, contenido de arcilla, comunidades microbianas y contenido de materia orgánica natural afectan el comportamiento de las NPs, incrementando o reduciendo su toxicidad, así como la capacidad de acumularse y adsorberse químicamente en el suelo (Babakhani *et al.*, 2018).

Las NPs afectan los agroecosistemas y generan un impacto negativo sobre la producción de alimentos básicos. El alto contenido de arcilla en el suelo favorece las interacciones electrostáticas y tensiones físicas, lo que reduce la movilidad de las NPs a través del suelo y favorece su acumulación, además algunos tipos de NPs como las de titanio pueden disminuir la disponibilidad de nutrientes minerales en el suelo como el hierro, el manganeso y el fósforo. Además, pueden inhibir los procesos microbianos disminuyendo la productividad de ciertas especies de plantas (Thiagarajan y Ramasubbu, 2021).

Remediación de suelos con nanopartículas

La remediación de suelos es un proceso esencial en aquellos espacios donde ha ocurrido contaminación industrial o urbana, debido a las consecuencias adversas que puede generar para la salud humana y el entorno natural. Su finalidad es alcanzar la reducción o eliminación de las sustancias contaminantes y evitar que se vuelvan acumular concentraciones nocivas. Sin embargo, este proceso constituye un gran desafío, ya que no solo implica la eliminación de los componentes dañinos, sino que incluye la recuperación del equilibrio natural de los ecosistemas alterados (WSP, 2023). En efecto, la remediación de suelos constituye una serie de técnicas que favorecen a reducir el daño ocasionado por la contaminación, logrando prevenir consecuencias mayores, además de sustentar acciones regenerativas para mejorar el equilibrio del medio ambiente.

En la actualidad, las matrices de agua, suelo y aire alrededor del mundo tienen algún grado de contaminación. A nivel de los suelos, el uso de productos químicos orgánicos e inorgánicos en los cultivos de interés comercial representa el principal problema de contaminación. Existen un nuevo tipo de contaminantes, los denominados contaminantes emergentes (CE), que constituyen una preocupación constante por su elevado contenido de sustancias químicas, pero que no están debidamente regulados a pesar de que se conoce su efecto negativo a las matrices del agua, suelo y aire, y de manera directa en el ser humano (Reichert *et al.*, 2019).

En el ambiente también se acumulan otros contaminantes, como los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), elementos bioactivos que no se solubilizan con facilidad y no se pueden evaporar a temperatura o presión normal, por lo que ingresan fácilmente al suelo y las aguas, generando efectos nocivos al ser humano y animales, alterando el sistema inmunológico; además, pueden ocasionar daños ecológicos, reducción la población de fauna en los ecosistemas contaminados (Al-Farsi *et al.*, 2017). Así como los contaminantes orgánicos persistentes (COPs), un gran grupo de contaminantes que poseen una prolongada vida media ambiental y un alto potencial de acumulación en los organismos, el medio ambiente y las redes alimentarias. Se trata de productos muy volátiles que se dispersan fácilmente en la atmósfera, además de ser fácilmente transportados a lugares remotos, poniendo en peligro los ecosistemas (Krasnobaev *et al.*, 2020).

En esta situación de contaminación, es donde las NPs y los nanomateriales de ingeniería (NMI) debido a su mínimo tamaño, alta superficie específica, versatilidad y reactividad, constituyen una alternativa potencial para eliminar contaminantes recalcitrantes. Además, de alcanzar una buena selectividad de aquellos contaminantes considerados como “objetivo” en medios naturales complejos debido a su efecto multifuncional, actuando sobre contaminantes considerados como múltiples y mixtos. Las NPs utilizadas para remediación de suelo están conformadas por tres capas: (1) una capa superficial capaz de fusionarse con pequeñas moléculas, como iones metálicos, tensioactivos o polímeros; (2) la capa del caparazón constituida por material diferente al del núcleo; (3) el núcleo o parte central (NP) (Khan *et al.*, 2019).

Al momento de remediación de suelos y aguas, es fundamental tener presente los siguientes criterios para la síntesis de las NPs: (1) las NPs no deben ser tóxicas; (2) se debe evitar la síntesis de sustancias orgánicas tóxicas y disolventes costosos, prefiriendo las soluciones acuosas; y (3) debe ser un proceso simple, de bajo costo y beneficioso. Por lo que para remediación de suelos y el tratamiento ambiental se utilizan con frecuencia elementos a base de hierro, como NPs de hierro (ZVI), sulfuro de hierro (FeS), magnetita (Fe₃O₄), fosfato de hierro (Fe₃(PO₄)₂), óxidos de metales binarios (Fe-Mn óxidos) y ZVI sulfurado (S-nZVI) (Cai *et al.*, 2020).

Para la remediación de suelos, existen tres procesos básicos que emplean las NPs: la adsorción, transformación y fotocatalisis.

1. Adsorción: se trata de un proceso exotérmico donde actúan las interacciones iónicas y superficiales mediante el uso de NPs de metal/óxido de metal (Me/MeONP), NPs bimetálicas, NPs modificadas y multi-componentes.
2. Transformación: se produce por la reducción u oxidación de los contaminantes orgánicos e inorgánicos, por medio de la eliminación de metales con NPs de hierro cero-valente a nano-escala (nZVI).
3. Fotocatalisis: se trata del empleo de un catalizador complejo de materiales semiconductores que permiten sensibilizar mediante la radiación visible o ultravioleta, lo que permite la formación de pares de electrones (Das *et al.*, 2018).

Durante el proceso de remediación de los suelos, las moléculas de agua se dividen en gas hidrógeno y radicales hidroxilos, los cuales son los responsables de la degradación oxidativa de los contaminantes orgánicos

Nanopartículas en remediación de metales pesados

A nivel de toxicidad, los principales metales pesados que perjudican la matriz del suelo son: arsénico (As), cromo (Cr), cadmio (Cd), mercurio (Hg), cobre (Cu), plomo (Pb), cobalto (Co), zinc (Zn), níquel (Ni) y selenio (Se). Así como algunos menos tóxicos, entre los que destacan oro (Au), plata (Ag), uranio (U) y antimonio (Sb). Por lo general, las principales fuentes contaminantes del suelo son la industria del papel, curtiduras, fábricas textiles y fertilizantes (Bakshi y Abhilash, 2019).

Entre las principales NPs utilizadas para la remediación de los suelos se encuentran las zeolitas, que tienen la función de inmovilizar los metales pesados y radionucleidos que se encuentren contaminando los suelos, siendo capaces de adsorber Zn, Pb, Cu y Cd; reduciendo su porcentaje entre un 42 a 72 %. Las NPs a base de óxido de hierro ($n\text{FeOx}$) son de bajo costo y amigables con el medio ambiente, además permiten adsorber e inmovilizar metales como Cd y As de estas matrices. La NPs a base de metales $n\text{ZVI}$ es la más utilizada en remediación de suelos, logrando reducir la concentración de cromo hexavalente Cr (VI) tóxico a cromo trivalente Cr (III) menos tóxico, asimismo se ha utilizado para eliminar parcialmente Pb, Zn y U (Bakshi y Abhilash, 2019).

En relación con lo anterior, la interacción de NPs y remediación de los pesticidas y compuestos orgánicos persistentes (COPs) son difíciles de degradar, se acumulan en el suelo y pueden contaminar la cadena alimentaria, representando un gran riesgo ambiental. Las NPs de hierro de valencia cero ($n\text{ZVI}$) se utilizan en fotocatalisis para eliminar contaminantes como tricloroetileno (TCE), bifenilos policlorados (PCB), trinitrotolueno (TNT), diclorodifeniltricloroetano (DDT) e ibuprofeno, convirtiéndolos en productos más inofensivos como CO_2 , N_2 y H_2O (Huang *et al.*, 2018).

CONCLUSIONES

1. Las nanopartículas (NPs) metálicas son contaminantes emergentes debido a su uso extendido en productos textiles, alimenticios, cosméticos, medicamentos, fertilizantes, pesticidas y pinturas, liberándose al medio ambiente y acumulándose en suelos, aguas residuales, desechos sólidos y lixiviados, contribuyendo a la contaminación ambiental.
2. A pesar de su potencial para mejorar la calidad de vida y los ecosistemas, las NPs metálicas presentan riesgos debido a su baja solubilidad, no evaporación a temperatura normal y alta reactividad nanométrica. Su regulación insuficiente, clasificada como contaminantes emergentes (CE), incrementa los riesgos de liberación intencional o involuntaria al medio ambiente.
3. En la agricultura, las NPs pueden aumentar la eficiencia de insumos agrícolas, reducir agroquímicos y promover la sostenibilidad mediante la remediación de suelos, tratamiento de aguas y interacción con microorganismos, ofreciendo soluciones innovadoras para la mejora de cultivos y reducción de químicos tradicionales.
4. Evaluar los riesgos ecotoxicológicos y el ciclo de vida de productos con NPs es un desafío, requiriendo el desarrollo de métodos estandarizados para su gestión ambiental. Es esencial minimizar la presencia de NPs en nuevos productos y asegurar una disposición adecuada, junto con una regulación efectiva y técnicas de remediación adecuadas para proteger el medio ambiente.
5. La contaminación por nanopartículas de metales pesados en el suelo es un tema emergente de gran preocupación debido a los potenciales riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Las futuras investigaciones deben centrarse en los efectos tóxicos y el comportamiento de estas nanopartículas en los organismos del suelo, así como su interacción con otros contaminantes. Se deben desarrollar y optimizar técnicas de fitorremediación utilizando plantas que puedan acumular y detoxificar nanopartículas de metales pesados. Además, es esencial avanzar en la nanotecnología verde, desarrollando métodos de síntesis de nanopartículas que minimicen el impacto ambiental.
6. El monitoreo y la regulación son componentes clave en la gestión de esta contaminación. Es necesario establecer estándares y normativas específicas para

la gestión y control de la contaminación por nanopartículas en el suelo. A su vez, es esencial aumentar la concienciación pública y fomentar colaboraciones interdisciplinarias para desarrollar nuevas tecnologías que prevengan la liberación de nanopartículas, protegiendo así los ecosistemas y la salud humana.

REFERENCIAS

1. Abbas, Q., G., Liu, B., Yousaf, M., Ali, H., Ullah, & R., Ahmed. 2019. Effects of biochar on uptake, acquisition and translocation of silver nanoparticles in rice (*Oryza sativa* L.) in relation to growth, photosynthetic traits and nutrients displacement. *Environ. Pollut.* 250: 728-736.
2. Aguilar, E., F. Paraguay-Delgado y N. Pariona. 2022. Nanopartículas de origen natural. Instituto de Ecología, A.C. INECOL. [En línea]. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/component/content/article/17-ciencia-hoy/1635-nanoparticulas-de-origen-natural> [Consulta: 23 noviembre 2023]
3. Al-Farsi, R., M. Ahmed, A. Al-Busaidi y B. Choudri. 2017. Translocation of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) into plant tissues. *Emerg Contam.* 3(4):132–7.
4. Babakhani, P., R. Doong y J. Bridge. 2018. Significance of Early and Late Stages of Coupled Aggregation and Sedimentation in the Fate of Nanoparticles: Measurement and Modeling. *Environ. Sci. Technol.* 52 (15): 8419–8428.
5. Bakshi, M., & P., Abhilash. 2019. Nanotechnology for soil remediation: Revitalizing the tarnished resource. *Energy Ecol. Environ.*, 4(2), 67–85.
6. Borja, J., & B., Rojas. 2020. Nanomateriales: métodos de síntesis. *Pol. Con.* 5(8): 426-445.
7. Cai, Z., X. Zhao, J. Duan, D. Zhao, Z. Dang y Z. Lin. 2020. Remediation of soil and groundwater contaminated with organic chemicals using stabilized nanoparticles: Lessons from the past two decades. *Front. Environ. Sci. Eng.* 14(5): 84.
8. Castro, D. 2021. Nanotecnología en la agricultura. *Rev. Natura*, 2(3): 48-53.

9. Chen, H. 2018. Metal based nanoparticles in agricultural system: behavior, transport, and interaction with plants. *Chem. Speciat. Bioavailab.* 30(1): 123-134.
10. Corpus, C., G. Rodríguez y G. Navarro. 2023. Nanomateriales: un rompecabezas científico. *Elementos.* (129): 41-46.
11. Das, S., J. Chakraborty, S. Chatterjee y H. Kumar. 2018. Prospects of biosynthesized nanomaterials for the remediation of organic and inorganic environmental contaminants. *Environ. Sci.: Nano.* 5(12):2784–2808.
12. EPA. 2023. Control of Nanoscale Materials under the Toxic Substances Control Act. United States Environmental Protection Agency. [en línea]. <https://www.epa.gov/reviewing-new-chemicals-under-toxic-substances-control-act-tsca/control-nanoscale-materials-under> [Consulta: 13 octubre 2023]
13. Farré, M., J., Sanchís, & D., Barceló. 2011. Analysis and assessment of the occurrence, the fate and the behavior of nanomaterials in the environment. *Trends Analyt Chem.* 30(3): 517-527.
14. FDA. 2018. Nanotechnology Guidance Documents. U.S. Food & Drug Administration. [En línea]. <https://www.fda.gov/science-research/nanotechnology-programs-fda/nanotechnology-guidance-documents> [Consulta: 13 octubre 2023]
15. Gogos, A., B. Thalmann, A. Voegelin y R. Kaegi. 2017. Sulfidation kinetics of copper oxide nanoparticles. *Environ Sci. Nano.* 4(8): 1733-1741.
16. Gómez, M. 2018. Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Repert. Med. Cir.* 27(2): 75-80.
17. Haris, Z., & I., Ahmad. 2017. Impact of metal oxide nanoparticles on beneficial soil microorganisms and their secondary metabolites. *Int. J. Life. Sci. Scienti. Res.* 3(3): 1020-1030.
18. Huang, D., X., Qin, Z., Peng, Y., Liu, X., Gong, G., Zeng, C., Huang, M., Cheng, W., Xue, X., Wang, & Z., Hu. 2018. Nanoscale zero-valent iron assisted phytoremediation of Pb in sediment: Impacts on metal accumulation and antioxidative system of *Lolium perenne*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 153:229–237.

19. John, A., M., Küpper, A., Manders, B., Debray, J., Lacombe, & T., Kuhlbusch. 2017. Emissions and possible environmental implication of engineered nanomaterials (ENMs) in the atmosphere. *Atmos.* 8(5): 84.
20. Juliño, M., F., Ocaña, & J., Concha. 2021. Contaminación ambiental y su influencia en la salud. *RenacientE.* 2(1): 75-90.
21. Khan, I., K., Saeed, & I., Khan. 2019. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arab. J. Chem.* 12(7): 908–931.
22. Krasnobaev, A., G., Dam, R., Boerrigter-Eenling, F., Peng, S., Van Leeuwen, S., Morley, L., Peck, & N., Van Den Brink. 2020. Legacy and Emerging Persistent Organic Pollutants in Antarctic Benthic Invertebrates near Rothera Point, Western Antarctic Peninsula. *Environ. Sci. Technol* 54(5): 2763–2771.
23. Lien, H., Y., Shih, W., Yan, & Y., Ok. 2017. Preface: Environmental nanotechnol. *J. Hazard. Mater.* 322: 1-324.
24. Lionello, D. 2018. Estudio de las propiedades mecánicas y tribológicas de materiales nanoestructurados. Tesis de Grado. Universidad Nacional de General San Martín. Buenos Aires, Argentina.
25. Lira, R., B., Méndez, G., Santos, & I., Vera. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Univ.* 28(2): 9-24
26. Lira, R., B., Méndez, I., Vera, & G., de los Santos. 2017. Agronanotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna. *Rev. Fac. Cienc. Agrar.* 50(2): 395-411.
27. Lizarazo, C., E., González, C., Arias, & J., Guarguati. 2018. Nanomateriales: un acercamiento a lo básico. *Med. Secur. Trab.* 64(251): 109-118.
28. Lohse, S. 2018. Las nanopartículas artificiales cambian de forma en el suelo y el agua subterránea. Centro de la Nanotecnología Sostenible. [en línea] <https://nano-sostenible.com/2018/04/06/las-nanoparticulas-artificiales-cambian-de-forma-en-el-suelo-y-el-agua-subterranea/> [Consulta: 11 noviembre 2023]
29. López, K., & F., Guzmán. 2021. Avances en la regulación ambiental de los contaminantes emergentes en agua, revisión de cinco disruptores endocrinos. *Aguas Latinoamérica.* 17: 83-87.

30. Nanowerk. 2017. Nanomaterials Database. [en línea]. <https://www.nanowerk.com/nanomaterial-database.php>. [Consulta: 13 octubre 2023]
31. Navarro, S., D., Meza, D., Soto, B., Castañeda, & M., Pedroza. 2021. Nanopartículas: efectos en la salud humana y el medio ambiente. *Epistemus*. 15(30): 58-64.
32. OCDE. 2021. Perspectivas de la OCDE sobre Ciencia, Tecnología e Innovación 2021. Oportunidades en tiempos de crisis. Instituto Politécnico Nacional.
33. Peng, C., W., Zhang, H., Gao, Y., Li, X., Tong, K., Li, X., Zhu, Y., Wang, & Y., Chen. 2017. Behavior and potential impacts of metal-based engineered nanoparticles in aquatic environments. *Nanomaterials*. 7(1): 21.
34. Rajput, V., T. Minkina, B. Ahmed, S. Sushkova, R. Singh, M. Soldatov, B. Laratte, A. Fedorenko, S. Mandzhieva, E. Blicharska, J. Musarrat, Q. Saquib, S. Flieger, y A. Gorovtsov 2019. Interaction of copper-based nanoparticles to soil, terrestrial, and aquatic systems: critical review of the state of the science and future perspectives. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 252: 51-96.
35. Reichert, G., S., Hilgert, S., Fuchs, & J., Rodrigues. 2019. Emerging contaminants and antibiotic resistance in the different environmental matrices of Latin America. *Environ. Pollut.* 255.
36. Sendra, M., I., Moreno, & J., Blasco. 2019. Toxicity of metal and metal oxide engineered nanoparticles to phytoplankton. *Ecotox. Nanopart. Aquat. Syst.* 1: 1-37.
37. Thiagarajan, V., & S., Ramasubbu. 2021. Fate and Behaviour of TiO₂ Nanoparticles in the Soil: Their Impact on Staple Food Crops. *Water. Air. Soil. Pollut.* 232 (7): 274.
38. Vázquez, E. 2023. Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. *Mundo Nano*.16(30): 1-25.
39. Villamor, E. 2020. Impacto medioambiental del uso de nanopartículas. Tesis de Grado. Universidad de Sevilla, Facultad de Farmacia. Sevilla, España.
40. Wang, S., M. Zhao, M. Zhou, Y. Li, J. Wang, B. Gao, S. Sato, K. Feng, W. Yin, A. Deshani, P. Oleszczuk, X. Wang, y Y. Ok 2019. Biochar-supported nZVI

- (nZVI/BC) for contaminant removal from soil and water: a critical review. *J. Hazard. Mater.* 373: 820-834.
42. WSP. 2023. Técnicas de remediación de suelos. [en línea] <https://www.wsp.com/es-cl/insights/tecnicas-de-remediacion-de-suelos> [Consulta: 14 octubre 2023]
43. Zhang, Z., M. Ke, Q. Qu, W. Peijnenburg, T. Lu, Q. Zhang, Y. Ye, P. Xu, B. Du, L. Sun, y H. Qian 2018. Impact of copper nanoparticles and ionic copper exposure on wheat (*Triticum aestivum* L.) root morphology and antioxidant response. *Environ. Pollut.*, 239: 689-697.

ANEXOS**ÍNDICE DE ABREVIATURAS**

CE	Contaminantes Emergentes
CNTs	Nanotubos de Carbono
COPs	Contaminantes Orgánicos Persistentes
ENPs	Nanopartículas diseñadas
ENM	Nanomateriales de Ingeniería
EPA	Agencia de Protección Ambiental
FDA	Administración de Alimentos y Medicamentos
i.a	Ingrediente Activo
Me/MeONP	Nanopartículas de Metal/Óxido de Metal
nFeOx	Nanopartículas a base de Óxido de Hierro
NMI	Nanomateriales de Ingeniería
NPs	Nanopartículas
NT	Nanotecnología
nm	Nanómetros
NMs	Nanomateriales
NZVI	Nanopartículas de Hierro de Valencia Cero
PPCPs	Productos Farmacéuticos y de Cuidado Personal
QDs	Puntos Cuánticos
UFP	Partículas Ultrafinas
VSSA	Área Superficial por Volumen Específico
WWTPs	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales
ZVI	Nanopartículas de Hierro
µm	Micrómetros