

***Arabidopsis thaliana*: una década como modelo de estudio de los efectos negativos de nanopartículas metálicas**

***Arabidopsis thaliana*: a decade as a model for studying the negative effects of metal nanoparticles**

Diego F. Monroy-Macías,* Luis A. Martínez-Chávez,* Ana A. Feregrino-Pérez,* Karen Esquivel-Escalante*[†]

ABSTRACT: Over the past decade, *Arabidopsis thaliana* has emerged as a key model organism to study the adverse effects of metallic nanoparticles (MNPs) in plants. This article presents a systematic review of recent scientific literature (2015-2025), focusing on the physiological, molecular, and ecological effects caused by various MNPs such as Ag, Au, Cu, ZnO, and TiO₂ on this plant species. The main findings include growth inhibition, photosynthesis disruption, flowering delay, oxidative stress, hormonal imbalances, and changes in gene expression. Indirect effects via alterations in soil microbiota are also addressed. The review emphasizes that the toxicological impact of MNPs depends on particle size, shape, surface charge, and concentration. Overall, *A. thaliana* is highlighted as a valuable predictive model for assessing ecological risks of MNPs and guiding the development of regulatory frameworks for nanotechnology in agriculture.

KEYWORDS: plant models, plant nanoscience, phytotoxicity, oxidative stress.

RESUMEN: En la última década, *Arabidopsis thaliana* se ha consolidado como un organismo modelo clave para estudiar los efectos adversos de nanopartículas metálicas (MNPs) en plantas. Este artículo presenta una revisión sistemática de literatura científica reciente (2015-2025), enfocada en los efectos fisiológicos, moleculares y ecológicos provocados por diferentes tipos de MNPs, como Ag, Au, Cu, ZnO y TiO₂, sobre esta especie vegetal. Se recopilan hallazgos sobre inhibición del crecimiento, alteraciones en la fotosíntesis, retraso en la floración, estrés oxidativo, desequilibrios hormonales y cambios en la expresión génica. Asimismo, se discuten los impactos indirectos a través de la alteración de la microbiota del suelo. La revisión destaca que los efectos tóxicos de las MNPs pueden depender de factores como el tamaño, la forma, la carga superficial y la concentración. Se concluye que *A. thaliana* representa una herramienta predictiva útil para evaluar el riesgo ecológico de las MNPs y apoyar el desarrollo de marcos regulatorios en nanotecnología agrícola.

PALABRAS CLAVE: modelos vegetales, nanociencia vegetal, fitotoxicidad, estrés oxidativo.

Introducción

Arabidopsis thaliana es un organismo modelo básico en biotecnología y fisiología vegetal debido a sus amplios recursos genéticos, genómicos y moleculares. Sirve

Recibido: 22 de abril, 2025.

Aceptado: 13 de enero, 2026.

Publicado: 5 de febrero, 2026.

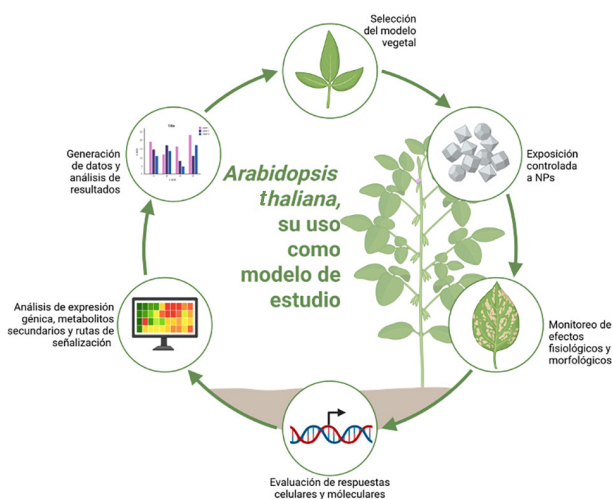
* Universidad Autónoma de Querétaro, División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería. Cerro de las Campanas, Querétaro 76010, México.

[†] Autora de correspondencia: karen.esquivel@uaq.mx

como referencia para comprender los procesos biológicos fundamentales y para la investigación aplicada en agricultura y biotecnología. *Arabidopsis* es la especie vegetal más estudiada, con una gran cantidad de datos genéticos y genómicos disponibles. Esto incluye un mapa de alta resolución de su transcriptoma de desarrollo, el cual ayuda a comprender la expresión génica en diferentes etapas y condiciones (Klepikova *et al.*, 2016; Yaschenko, Alonso y Stepanova, 2024).

El modelo vegetal de *Arabidopsis thaliana* permite trasladar los resultados observados a nivel laboratorio a cultivos en escala semipiloto, contribuyendo a la innovación agrícola y biotecnológica (Somssich, 2022). De igual manera, esta especie vegetal es un modelo clave para la biología sintética, que proporciona herramientas para la ingeniería metabólica. Se ha utilizado para diseñar características como la disminución de lignina y el aumento del aceite de las semillas, sirviendo como base para experimentos de prueba de concepto (Holland y Jez, 2018). Las capacidades regenerativas de la planta están bien estudiadas y ofrecen información sobre los mecanismos celulares y moleculares de la regeneración vegetal, a pesar de sus paredes celulares rígidas y la falta de migración celular (Mathew y Prasad, 2021). Asimismo, *Arabidopsis thaliana* se utiliza para estudiar la biología evolutiva y sus mecanismos de adaptación a diferentes entornos (Kang *et al.*, 2022; Koch, 2018). Esta especie también ha sido empleada para obtener conocimiento sobre cómo proporcionar mejoramiento molecular en el desarrollo de los árboles, a pesar de ser una planta herbácea (Mu *et al.*, 2018). De tal modo, se considera a *Arabidopsis thaliana* como un modelo vegetal indispensable para estudios genéticos, genómicos y moleculares; teniendo un papel en la investigación de continua relevancia para el avance de la ciencia vegetal y la biotecnología agrícola (figura 1).

Figura 1. *Arabidopsis thaliana* como modelo de estudio.



Fuente: Adaptada de Somssich (2022), y, Holland y Jez (2018).

El estudio de las nanopartículas metálicas (MNPs) en plantas es crucial debido a su creciente aplicación en la nanotecnología agrícola, prometiendo mejorar la productividad de los cultivos, mejorar la absorción de nutrientes y promover prácticas agrícolas sostenibles. Existen estudios donde las MNPs como la plata (Ag), el oro (Au), el cobre (Cu) y el zinc (Zn) pueden aumentar la productividad de los cultivos en un promedio del 20% y reducir la incidencia de enfermedades hasta en un 50% cuando se utilizan como agentes antimicrobianos. También mejoran la tolerancia al estrés y la eficiencia en el uso de nutrientes, contribuyendo a la agricultura sostenible y a la seguridad alimentaria (Francis *et al.*, 2024; Dey *et al.*, 2024; Maity, Gupta y Saha, 2022). Las MNPs pueden mejorar la absorción de nutrientes y reducir su lixiviación en un 30%, lo cual beneficia la salud del suelo. Actúan como nanofertilizantes, mejorando el crecimiento vegetal y la eficiencia de la absorción de nutrientes (Santás-Miguel *et al.*, 2023; Dam *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2024). Ciertas MNPs como AgNPs, AuNPs y CuNPs actúan como agentes antimicrobianos eficaces y se utilizan en nanopesticidas y nanoherbicidas, reduciendo la dependencia de los agroquímicos convencionales (Dey *et al.*, 2024; Ulhassan *et al.*, 2022). Las MNPs tienen un gran potencial para revolucionar la agricultura al aumentar la productividad, optimizar la gestión de nutrientes y promover la sostenibilidad. Sin embargo, abordar los riesgos asociados y las lagunas en la investigación es crucial para su uso seguro y eficaz en las prácticas agrícolas. Existiendo, además, una preocupación legítima por la potencial toxicidad de las MNPs, su acumulación y sus efectos adversos en organismos a lo largo de la cadena alimentaria. Comprender estos riesgos es fundamental para su integración segura en las prácticas agrícolas (Ulhassan *et al.*, 2022; Santás-Miguel *et al.*, 2023).

Se ha demostrado que las MNPs afectan negativamente a *Arabidopsis thaliana*, mediante diversos mecanismos fisiológicos y moleculares. Estos efectos se han estudiado exhaustivamente durante la última década. Por ejemplo, las nanopartículas de plata (AgNPs) inhiben significativamente el crecimiento de estas plantas, afectando el desarrollo de los brotes y las raíces con mayor intensidad que la plata iónica (Ag^+) (Ke *et al.*, 2018b; Li *et al.*, 2018a). De igual manera, la exposición a nanopartículas de óxido de aluminio ($\text{n-Al}_2\text{O}_3$) reduce el peso de los brotes y las raíces (Jin *et al.*, 2017). Las AgNPs, nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2NPs) y dióxido de cerio (CeO_2NPs) interrumpen la fotosíntesis, lo cual conduce a una disminución de la eficiencia de síntesis de clorofila (Sosan *et al.*, 2016a). Estas nanopartículas interfieren directamente en los cloroplastos, afectando los fotosistemas I y II, limitando la fijación de carbono y la producción de ATP. En particular, las AgNPs generan especies reactivas de oxígeno (ROS) en los tilacoides, mientras que las TiO_2NPs alteran la estructura de las membranas tilacoidales y las CeO_2NPs reducen la eficiencia cuántica del fotosistema II (Wu, Tito y Giraldo, 2017; Shull, Kurepa y Smalle, 2019). Otro efecto negativo relevante de las MNPs sobre *Arabidopsis thaliana* es que inducen estrés

oxidativo al generar especies reactivas de oxígeno (ROS), que pueden dañar los componentes celulares. Esta respuesta al estrés suele ir acompañada de una regulación positiva de los genes implicados en las respuestas al estrés oxidativo (Landa *et al.* 2017). Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnONPs) alteran los depósitos hormonales, suprimiendo las hormonas que promueven el crecimiento, como las citoquininas y las auxinas, mientras aumentan las hormonas relacionadas con el estrés, como el ácido abscísico y el ácido salicílico (Vaňková *et al.*, 2017).

En general, las MNPs afectan negativamente a *Arabidopsis thaliana* al inhibir el crecimiento, interrumpir la fotosíntesis, retrasar la floración, inducir estrés oxidativo, alterar las vías metabólicas y causar desequilibrios hormonales. Estos efectos suelen ser más pronunciados con las NPs que con sus contrapartes iónicas o en bulto, poniendo de relieve los desafíos únicos planteados por la exposición a las NPs en las plantas. A nivel celular, los daños se manifiestan principalmente en las células de la raíz y los cloroplastos. Las AgNPs provocan desorganización de la pared celular y ruptura de membranas plasmáticas; las CuONPs inducen vacuolización y condensación nuclear; mientras que las ZnONPs alteran la ultraestructura de los cloroplastos y mitocondrias (Azhar *et al.*, 2020; Nair y Chung, 2017). Estas alteraciones se relacionan con la generación excesiva de ROS y la activación de vías de defensa antioxidante como la del glutatión y la ascorbato-peroxidasa. Por lo cual, la presente revisión bibliográfica tiene como objetivo mostrar los efectos negativos en la última década (2015-2025) de MNPs sobre *Arabidopsis thaliana*, como modelo vegetal representativo, para proyección de efectos tóxicos de MNPs en diferentes hortalizas como base para la construcción de un marco regulatorio legal para la aplicación de nanomateriales (NMs) como aditivos en la agricultura.

Nanopartículas metálicas: tipos y propiedades relevantes

Las nanopartículas metálicas (NPMs) son estructuras diminutas con dimensiones que oscilan entre 1 y 100 nanómetros (nm). Estas partículas exhiben propiedades físicas, químicas y biológicas únicas debido a su alta relación superficie-volumen, lo cual no se observa en los materiales a escala más grande. Gracias a esta característica, presentan una reactividad superficial aumentada, haciendo que se puedan aprovechar en distintos campos como la medicina, la electrónica, la catálisis y la ciencia de materiales (Jamkhande *et al.*, 2019). Existen diferentes tipos de nanopartículas (NPs) de acuerdo con su naturaleza de origen, como son las nanopartículas metálicas (MNPs) y de óxidos metálicos, en la tabla 1, se muestran algunos ejemplos de ellas y sus características generales.

Las propiedades fisicoquímicas de las nanopartículas metálicas que afectan su interacción con *Arabidopsis thaliana* incluyen principalmente el tamaño de partícula, la carga superficial, la composición química, la concen-

Tabla 1. Características generales de MNPs y de óxidos metálicos.

Nanopartículas metálicas	Características	Referencia
Aluminio (Al)	Alta reactividad, sensible a la humedad, al calor y a la luz solar, gran superficie.	Geetha <i>et al.</i> (2016)
Hierro (Fe)	Reactivo e inestable, sensible al aire (oxígeno) y al agua.	Harshiny, Iswarya y Matheswaran (2015)
Plata (Ag)	Absorbe y dispersa la luz, estable, antibacteriano, desinfectante.	Castillo-Henríquez <i>et al.</i> (2020)
Oro (Au)	Interactivo con luz visible, reactivo.	Syed, Prasad y Satish (2016)
Cobalto (Co)	Inestable, magnético, tóxico, absorbe microondas, magnético.	Cao <i>et al.</i> (2018)
Cobre (Cu)	Dúctil, muy alta conductividad térmica y eléctrica, sólidos altamente inflamables.	Ryu, Joo y Kim (2016)
Zinc (Zn)	Antibacteriano, anticorrosivo, antifúngico, filtrado UV.	Racca <i>et al.</i> (2018)
Óxido de titanio (TiO ₂)	Gran superficie, inhibe el crecimiento bacteriano.	Tumburu <i>et al.</i> (2017)
Óxido de hierro (FeO)	Reactivo, gran aplicación en remediación ambiental.	Ruales-Lonfat <i>et al.</i> (2015)
Óxido de silicio (SiO ₂)	Estable, capacidad de funcionalización.	Babu <i>et al.</i> (2024)
Óxido de zinc (ZnO)	Antibacteriano, anticorrosivo, antifúngico.	Zango <i>et al.</i> (2025)
Óxido de cerio (CeO ₂)	Antioxidante, bajo potencial de reducción.	Kim y Chung (2016)

Fuente: Elaboración de los autores.

tración y el estado de agregación. El tamaño es determinante, pues diversos estudios han demostrado que las nanopartículas de oro (AuNPs) de 5 nm no logran atravesar la pared celular de las raíces de *A. thaliana*, independientemente de su carga, debido al tamaño limitado de los poros celulares (Judy *et al.*, 2012). No obstante, en células sin pared (protoplastos), tanto NPs con carga positiva como negativa pueden ser internalizadas, indicando que la carga superficial influye directamente en la interacción celular (Milewska-Hendel *et al.*, 2019).

Además del tamaño y la carga, otras propiedades fisicoquímicas como la morfología, potencial zeta, el tipo de recubrimiento y la hidrofobicidad modulan la interacción entre las NPs y las células vegetales. Por ejemplo, las nanopartículas con morfología esférica o con bordes redondeados tienden a agregarse menos y presentan mayor movilidad en el apoplasto, mientras aquellas de geometrías angulares pueden causar mayor daño mecánico a la pared celular (Syu *et al.*, 2014). El potencial zeta condiciona la estabilidad coloidal y, por lo tanto, la biodisponibilidad de las partículas en el medio de cultivo (Milewska-Hendel *et al.*, 2019). De igual manera, los recubrimientos su-

periciales determinan la afinidad con la pared celular; las nanopartículas con recubrimientos cargados positivamente se adhieren más fácilmente a los grupos carboxílicos de la pectina, favoreciendo su retención en las raíces, mientras que los recubrimientos poliméricos o biogénicos tienden a reducir la fitotoxicidad al limitar la liberación de iones metálicos (Geisler-Lee *et al.*, 2013; Castillo-Henríquez *et al.*, 2020). En conjunto, estas propiedades determinan el grado de absorción, transporte intracelular y acumulación de las NPs en tejidos específicos, influyendo de manera crítica en los efectos fisiológicos observados en *Arabidopsis thaliana* (Judy *et al.*, 2012).

Por su parte, la composición química define la reactividad y toxicidad de las NPs. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de zinc (ZnONPs) han mostrado ser altamente fitotóxicas en *A. thaliana*, en comparación con otras como magnetita (Fe_3O_4 NPs) u óxido de silicio (SiO_2 NPs), debido en parte a la disolución de iones metálicos (Lee *et al.*, 2010).

Además, la concentración de las nanopartículas es un factor crítico en su efecto fitotóxico. Se ha demostrado que, a igual concentración, las NPs más pequeñas resultan más tóxicas que las de mayor tamaño, implicando que tanto el tamaño como la dosis deben considerarse al evaluar el impacto en plantas. Finalmente, el estado de agregación también condiciona la biodisponibilidad y la absorción. En conjunto, estas propiedades determinan la forma en la cual las NPs son absorbidas, transportadas y cómo influyen en procesos fisiológicos de la planta modelo, siendo esenciales para entender su impacto. Se ha observado que las NPs tanto metálicas como de óxidos metálicos son absorbidas principalmente a través de las raíces en *Arabidopsis thaliana* (Bombin *et al.*, 2015; Geisler-Lee *et al.*, 2013; Parashar *et al.*, 2024; Rohela *et al.*, 2024).

Fitotoxicidad de las nanopartículas metálicas en *Arabidopsis thaliana*

Las nanopartículas de óxidos metálicos como el ZnO pueden inhibir la germinación de semillas de *Arabidopsis thaliana*, especialmente cuando se utilizan partículas de tamaño nanométrico. La toxicidad observada no se atribuye únicamente a la disolución de zinc en el medio, pues las concentraciones de zinc soluble en las suspensiones de nanopartículas son significativamente menores que las concentraciones inhibitorias de sales de zinc disueltas, indicando que las propiedades físicas de las nanopartículas también juegan un papel crucial en su toxicidad (Nair y Chung, 2017). Además, se ha demostrado que las nanopartículas metálicas, en específico las AgNPs, comienzan a mostrar efectos negativos significativos en *Arabidopsis thaliana* a una concentración de 12.5 mg/kg en el suelo. A esta concentración, se retrasa el tiempo de floración en 5 días, se reduce el peso fresco, el número de vainas y la biomasa de las plantas, y afectan negativamente varias vías metabólicas relacionadas con la producción de energía. Estos efectos son más severos que los causados

por los iones Ag^+ , incluso a la misma concentración (Ke *et al.*, 2018a). Por otro lado, las AuNPs reducen la longitud de las raíces primarias en aproximadamente 50% a una concentración de 100 mg/L, al igual que se disminuye el número de raíces laterales en un 70% (Siegel *et al.*, 2018). También el peso fresco de los brotes se vio afectado.

Las alteraciones morfológicas en *Arabidopsis thaliana* debido a la exposición a NPs incluyen principalmente cambios en el crecimiento radicular, el desarrollo de raíces laterales, la biomasa total y la reproducción. Por ejemplo, las AgNPs han demostrado inhibir significativamente el alargamiento de la raíz y reducir la biomasa de las plántulas en función de la dosis administrada (Geisler-Lee *et al.*, 2013). En contraste, las AuNPs de 10 nm promueven el crecimiento de pelos radiculares a concentraciones elevadas, aunque al mismo tiempo inhiben la elongación de la raíz primaria (Siegel *et al.*, 2018). Además, las formas geométricas de las nanopartículas también afectan la respuesta morfológica: las AgNPs de forma triangular y decaédrica estimulan el crecimiento radicular, mientras que las esféricas no presentan efecto significativo (Syu *et al.*, 2014). NPs de óxidos de hierro afectan negativamente la viabilidad del polen, el crecimiento del tubo polínico y la producción de semillas. Estas alteraciones parecen estar relacionadas con la carga superficial de las partículas. Estos cambios morfológicos también pueden estar asociados con la modificación de la porosidad de la pared celular vegetal, afectando tanto la absorción de nutrientes como la acumulación de NPs (Bombin *et al.*, 2015; Yoon *et al.*, 2019). Se ha reportado que las NPs de óxido de cobre (CuONPs) generan estrés que reduce la biomasa, el tamaño de la roseta y la cantidad de clorofila (Azhar *et al.*, 2020). Este efecto se debe principalmente a la acumulación de iones Cu^{2+} liberados por las nanopartículas, los cuales inducen estrés oxidativo mediante la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en los cloroplastos y las mitocondrias (Nair y Chung, 2017). El aumento de ROS causa peroxidación de lípidos, daño a proteínas y degradación de pigmentos fotosintéticos, reduciendo la eficiencia de la fotosíntesis y, en consecuencia, el crecimiento y la producción de biomasa (Azhar *et al.*, 2020). Además, las CuONPs alteran la absorción de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y hierro, afectando la biosíntesis de clorofila y la expansión celular. A nivel fisiológico, se ha observado una disminución en la tasa de asimilación de CO_2 y en la transpiración, indicando una restricción en el metabolismo energético de la planta (Azhar *et al.*, 2020).

Se ha observado que las ZnONPs alteran el equilibrio redox celular y causan toxicidad en todos los genotipos de *Arabidopsis thaliana* (Vankova *et al.*, 2017). *Arabidopsis thaliana* también responde al estrés inducido por NPs mediante la activación de enzimas antioxidantes clave, como la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y glutatión peroxidasa (GPX) (Nair y Chung, 2017; Ma *et al.*, 2013). De igual manera, se ha observado que en presencia de NPs existe un aumento significativo en la expresión de genes que participan en el manejo del estrés oxidativo (Bombin *et al.*, 2015). Las NPs

inducen una respuesta transcripcional significativa en *Arabidopsis thaliana*, modulando numerosos genes relacionados con el estrés abiótico y la detoxificación celular. Estas respuestas incluyen la activación de genes asociados con el manejo de estrés oxidativo, salino, osmótico, hídrico y por metales pesados, así como rutas de respuesta hormonal. En la tabla 2, se mencionan de manera general algunos efectos de manera comparativa entre MNPs sobre los procesos germinativos y fisiológicos en *Arabidopsis thaliana*.

Tabla 2. Efectos comparativos de nanopartículas sobre procesos germinativos y fisiológicos en *Arabidopsis thaliana*.

Nanopartícula	Efectos en germinación y desarrollo de plántula	Alteraciones morfológicas y fisiológicas	Referencia
Au	Mejora significativa de la germinación (10-80 µg/ml).	Promueve el desarrollo temprano sin efectos adversos reportados.	Kumar <i>et al.</i> (2013)
CuO	Inhibe la germinación y elongación de raíces a 20-50 mg/L.	Transferencia raíz-tallo; acumulación de ROS.	Wang <i>et al.</i> (2016)
Ag	Disminuye la elongación radicular; efectos transgeneracionales negativos.	Alteración de metabolismo secundario y perfil fenólico.	Geisler-Lee <i>et al.</i> (2014); Qian <i>et al.</i> (2013)
CeO ₂	Mejora el crecimiento radicular bajo estrés UV-B; promueve enzimas antioxidantes.	Modulación del ciclo celular y vías auxínicas.	Wu, Tito y Giraldo (2017)
ZnO	Inhibe el crecimiento y fotosíntesis; aumenta el estrés oxidativo.	Alteración en expresión génica, fotosíntesis y homeostasis hormonal.	Lee <i>et al.</i> (2010); Vankova <i>et al.</i> (2017)

Fuente: Elaboración de los autores.

Impacto de las nanopartículas en la microbiota del suelo y su relación con *Arabidopsis thaliana*

Las nanopartículas (NPs) tienen un impacto significativo sobre la microbiota del suelo, lo cual repercute directamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Liu *et al.*, 2018). La interacción entre estas partículas y los microorganismos edáficos puede alterar tanto la estructura como la función de las comunidades microbianas, afectando la salud vegetal y el equilibrio del ecosistema del suelo (Asadishad *et al.*, 2018). En particular, NPs como las de plata (AgNPs) y óxido de zinc (ZnONPs) han demostrado modificar la composición microbiana al disminuir la abundancia de bacterias beneficiosas como *Dyella*, *Methylophilus* y *Streptomyces*, organismos clave para el crecimiento vegetal y la resistencia a enfermedades (Xu *et al.*, 2022; Chavan y Nadanathangam, 2019). Asimismo, los nanomateriales diseñados (ENMs, por sus siglas en inglés) pueden incidir en procesos edáficos esenciales, como la fijación de nitrógeno y la

mineralización, al afectar la diversidad y la abundancia microbiana (Khan *et al.*, 2021; Ameen *et al.*, 2021). Otro aspecto relevante es la influencia de las NPs sobre la actividad enzimática del suelo, fundamental para los ciclos biogeoquímicos. Aunque algunas NPs, como las de ZnO y CuO, han mostrado un efecto estimulante sobre ciertas enzimas, otras como las AgNPs y las nanopartículas de poliestireno pueden inhibir su actividad, especialmente a concentraciones elevadas (Awet *et al.*, 2018; Macůrková *et al.*, 2021). Esta variabilidad en los efectos resalta la importancia de considerar tanto la naturaleza química como la dosis de las nanopartículas al evaluar su impacto ambiental.

En el entorno rizosférico, donde ocurre la interacción directa entre raíces y microbiota, las NPs también desempeñan un papel determinante. Su influencia sobre el desarrollo vegetal y las comunidades microbianas puede ser positiva o negativa, dependiendo de su tipo y comportamiento en dicho entorno (Kibbey y Strevett, 2019). Por ejemplo, nanopartículas como las de poliestireno modificado, TiO₂ y CeO₂ han sido asociadas con una reducción en el crecimiento de raíces y tallos, ya sea por la disminución de microorganismos rizosféricos o por la inducción de estrés oxidativo (Xie *et al.*, 2022). En contraste, las nanopartículas basadas en silicio (SiNPs y SiO₂NPs) han demostrado efectos beneficiosos al mitigar el estrés en plantas, mejorar la actividad antioxidante y favorecer la producción de metabolitos en la rizosfera, sin comprometer la biomasa vegetal (Rajput *et al.*, 2021; Tian *et al.*, 2020).

En este contexto, *Arabidopsis thaliana* se ha consolidado como una planta modelo de referencia por su genoma, ciclo de vida corto y facilidad de manipulación genética (Geng *et al.*, 2022). Su capacidad para reflejar respuestas generalizables a estresores ambientales, como las nanopartículas, la convierte en una herramienta valiosa para evaluar el impacto de estos materiales en otros sistemas vegetales. Con el incremento de NPs en los ecosistemas, el uso de *Arabidopsis thaliana* como organismo modelo permite predecir riesgos ambientales y comprender las respuestas fisiológicas de las plantas ante estos compuestos (Geng *et al.*, 2022). Diversos estudios han documentado cómo la exposición a AgNPs y ZnONPs puede afectar parámetros fisiológicos en *Arabidopsis thaliana*, tales como el crecimiento, la fotosíntesis y las respuestas al estrés oxidativo, proporcionando un panorama detallado sobre los mecanismos de fitotoxicidad inducida por MNPs (Ke *et al.*, 2018a; Sosan *et al.*, 2016b; Yang *et al.*, 2023). Aunque la biomasa de esta planta puede mantenerse estable en algunos casos, se ha observado una reducción en la duración del ciclo de vida y un aumento en la fluorescencia radicular, indicadores de estrés y alteraciones metabólicas. Además, se ha reportado que ciertas MNPs, como las de TiO₂, pueden contrarrestar los efectos tóxicos de otras, como las de plata, tanto en *Arabidopsis thaliana* como en la microbiota del suelo, lo cual abre nuevas posibilidades para el desarrollo de estrategias de mitigación en contextos agrícolas (Liu *et al.*, 2019). En la tabla 3, se presentan: la respuesta de estrés oxidativo, mecanismos de defensa, expresión génica y señalización celular por la presencia de MNPs en *Arabidopsis thaliana*.

Tabla 3. Efecto-respuesta en el estrés oxidativo, señalización celular y regulación génica en *Arabidopsis thaliana* por MNPs.

Nanopartícula	Respuesta de estrés oxidativo y mecanismos de defensa	Efectos en expresión génica y señalización celular	Referencia
Au	Modula expresión de micro ARNs asociados a desarrollo y respuesta al estrés.	Influencia en rutas hormonales y de señalización redox mediante miRs.	Kumar <i>et al.</i> (2013)
CuO	Generación elevada de ROS en raíces; activación de genes antioxidantes.	Regulación positiva de genes relacionados con el estrés oxidativo.	Tang <i>et al.</i> (2016)
TiO₂	Induce estrés oxidativo en cloroplastos; activa autofagia para mitigar daño.	Modula genes relacionados con biosíntesis de vitamina E y defensas antioxidantes.	Shull, Kurepa y Smalle (2019); Szymańska <i>et al.</i> (2016)
CeO₂	Incrementa actividad de SOD, POD y CAT; reduce peroxidación lipídica.	Induce genes de auxina y antioxidantes bajo estrés UV-B.	Wu, Tito y Giraldo (2017)
Ag	Daño oxidativo mitigado por herbicidas; altera glutatión y enzimas antioxidantes.	Regulación de vías del thalianol; genes de recombinación homóloga y glutatión.	Kaveh <i>et al.</i> (2013); Li <i>et al.</i> (2018b)
ZnO	Alteración hormonal; aumento de ácido abscísico y salicílico bajo estrés.	Disminución de transcritos de metabolismo celular; activación de vías de estrés.	Vaňková <i>et al.</i> (2017); Landa <i>et al.</i> (2012)

Fuente: Elaboración de los autores.

En conjunto, las MNPs generan efectos diversos en *Arabidopsis thaliana*, desde la estimulación del crecimiento hasta manifestaciones claras de fitotoxicidad, dependiendo del tipo y concentración del nanomaterial. Además, su impacto puede variar según las características del suelo y el tiempo de exposición. Mientras algunos estudios sugieren que los efectos pueden disminuir con el tiempo, otros indican cambios persistentes en las comunidades microbianas, lo cual podría comprometer de forma prolongada la funcionalidad del ecosistema edáfico (Joško *et al.*, 2019; Frenk *et al.*, 2013; Grün *et al.*, 2019).

Consideraciones ambientales y perspectivas futuras

El uso de nanopartículas metálicas en la agricultura ha generado un gran interés debido a sus propiedades, confiriéndoles mayor eficiencia en fertilización, control de plagas y enfermedades, detección de contaminantes, biodisponibilidad de nutrientes, estimuladores del crecimiento, productividad y rendimiento en diversos cultivos (Ashraf *et al.*, 2021); sin embargo, su implementación conlleva consideraciones ambientales importantes y desafíos que deben abordarse antes de su adopción generalizada, dado que pueden presentarse impactos negativos, por ejemplo, modificación de las poblaciones

microbianas del suelo (MO-S), alteración de los ciclos biogeoquímicos, modificación de agentes productores y reguladores de compuestos cruciales para los cultivos, alteraciones físicas y químicas del suelo, agua y aire (Jain *et al.*, 2018; Peyrot *et al.*, 2013). Por lo anterior, se debe tener en consideración la ruta de entrada de las MNPs, sus patrones de acumulación, migración e interacción con los propios materiales presentes en el ecosistema (Ali, Mehmood y Khan, 2021; Saleem y Zaidi, 2020). Por ejemplo, se ha observado que la materia orgánica puede ejercer fenómenos de absorción y estabilización de MNPs en suelo, mientras que la MO-S puede absorber las MNPs reduciendo la biodisponibilidad de estas y por ende su toxicidad (Rippner *et al.*, 2018). En la última década se ha incrementado la preocupación sobre el manejo de las MNPs, sus efectos tóxicos, riesgos e impacto en el medio ambiente. En este sentido, las plantas tienen un papel importante como centinelas sobre los efectos ambientales de la liberación de MNPs (Fatima, Hashim y Anees, 2021). Uno de los modelos más empleado, como ha sido mencionado, es *Arabidopsis thaliana* dado que presenta ventajas al conocerse sus mecanismos en el crecimiento y desarrollo *in vitro*, así como la secuencia de su genoma. Adicionalmente, como modelo *in vivo*, es una planta de fácil manejo y crecimiento bajo condiciones controladas. *Arabidopsis thaliana* se ha consolidado como un modelo vegetal clave en la investigación sobre los efectos negativos de las NPs en plantas. Durante la última década, los efectos adversos observados incluyen la inhibición del crecimiento radicular, alteraciones en la germinación, generación de estrés oxidativo mediante la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y cambios en la expresión de genes relacionados con la respuesta al estrés (Nair y Chung, 2017; Yang *et al.*, 2023). Esta investigación es crucial para evaluar los riesgos ambientales asociados con el uso creciente de MNPs en la industria y la agricultura, así como para el desarrollo de estrategias de mitigación de su toxicidad en plantas. Sin embargo, no hay que perder de vista que las MNPs proporcionan respuestas diferentes dependiendo del método de aplicación, dosis, tamaño y tipo de MNPs, así como tipo de cultivo y exposición al mismo (Fernández-Luqueño, Vera-Reyes y Loera-Serna, 2022). Si bien la necesidad tangible de mayor cantidad de alimento es una realidad mundial, también es necesario evaluar y ser conscientes de que la nanotecnología se encuentra en una fase experimental de aplicación en la agricultura, donde los niveles de exposición, y repercusión toxicológica para el medio ambiente y el humano aún están en evaluación (Camara *et al.*, 2019). Sin perder de vista los resultados alcanzados y discutidos a nivel científico, se espera que los estudios aporten información sobre la influencia significativa por la acumulación e internalización de las MNPs en la salud microbiana y vegetal, aspectos metabólicos y contaminación del medio ambiente (Chen *et al.*, 2024), pudiendo discernir las lagunas de conocimiento referentes a posibles efectos negativos de las MNPs sobre células y tejidos, vías de inhalación o ingesta, dosis máximas de exposición, biodurabilidad y riesgos de exposición.

En el aspecto de regularización de las MNPs, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), así como la FDA (por sus siglas en inglés, Food and Drug Administration), han emitido algunos lineamientos sobre información y registro para sustancias químicas que se fabrican o procesan a nanoescala, lo anterior, buscando garantizar que los materiales a nanoescala no generen efectos dañinos a la salud humana y el medio ambiente (Berger y Engelmann, 2025). Pese a este tipo de avances, aun existen huecos de conocimiento que permitan enmarcar una regulación eficiente para el uso de las NPs en la agricultura.

Por todo lo anterior es necesario y urgente seguir realizando estudios que aporten información para la regularización y generación de un marco normativo para el uso y empleo de MNPs. Desafortunadamente, los esfuerzos gubernamentales para la regularización en el uso de nanomateriales en el sector agrícola no han avanzado paralelamente con la necesidad de materias primas para una población mundial creciente.

Conclusiones

Arabidopsis thaliana ha demostrado ser un modelo vegetal clave para estudiar los efectos adversos de las nanopartículas metálicas (MNPs) durante la última década. Esta revisión bibliográfica documenta múltiples alteraciones fisiológicas, morfológicas y moleculares provocadas por MNPs como Ag, Au, Cu, ZnO y TiO₂, entre las cuales destacan: la inhibición del crecimiento, alteraciones en la germinación, reducción en la biomasa, estrés oxidativo, y modificaciones en la expresión génica y el equilibrio hormonal. Además, se ha identificado un impacto indirecto a través de la alteración de la microbiota del suelo, lo cual puede afectar la salud y el desarrollo vegetal a largo plazo. Los efectos observados dependen de factores como el tipo de nanopartícula, su concentración, tamaño, carga superficial, estado de agregación y método de aplicación. Estos hallazgos refuerzan el valor de *A. thaliana* como herramienta predictiva para evaluar los riesgos ambientales de nanomateriales aplicados en la agricultura. Pese a los avances, aún existen vacíos significativos en el conocimiento sobre los mecanismos moleculares de toxicidad, la biodisponibilidad en condiciones reales de campo, y los efectos acumulativos o transgeneracionales. Por ello, es prioritario promover investigaciones que profundicen en la comprensión de estas interacciones y que permitan establecer límites seguros de exposición. Asimismo, urge el desarrollo de normativas y marcos regulatorios robustos que acompañen el crecimiento del uso de nanomateriales en agroecosistemas, garantizando la seguridad ambiental, vegetal y humana. *Arabidopsis thaliana*, por su disponibilidad genómica, facilidad de cultivo y respuestas bien caracterizadas, seguirá desempeñando un papel fundamental en esta tarea.

Contribución de autorías

Luis A. Martínez-Chávez, Ana A. Feregrino-Pérez, Karen Esquivel-Escalante: concepción y diseño del artículo.

Diego F. Monroy-Macías, Ana A. Feregrino-Pérez, Karen Esquivel-Escalante: desarrollo metodológico.

Diego F. Monroy-Macías, Luis A. Martínez-Chávez, Ana A. Feregrino-Pérez, Karen Esquivel-Escalante: minería de datos, análisis e interpretación.

Diego F. Monroy-Macías, Luis A. Martínez-Chávez: redacción del borrador original.

Ana A. Feregrino-Pérez, Karen Esquivel-Escalante: revisión y edición final del texto.

Referencias

- Ali, Shahid, Asif Mehmood y Naeem Khan. 2021. Uptake, translocation, and consequences of nanomaterials on plant growth and stress adaptation. *Journal of Nanomaterials*, 2021(1): 6677616. <https://doi.org/10.1155/2021/6677616>.
- Ameen, Fuad, Khawla Alsamhary, Jamila A. Alabdullatif y Saleh Alnadhari. 2021. A review on metal-based nanoparticles and their toxicity to beneficial soil bacteria and fungi. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213: 112027. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2021.112027>.
- Asadishad, Bahareh, Shawninder Chahal, Ali Akbari, Vanessa Cianciarelli, Mehrnoosh Azodi, Subhasis Ghoshal y Nathalie Tufenkji. 2018. Amendment of agricultural soil with metal nanoparticles: effects on soil enzyme activity and microbial community composition. *Environmental Science and Technology*, 52(4): 1908-1918. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.7b05389>.
- Ashraf, Syed Amir, Arif Jamal Siddiqui, Abd Elmoneim O. Elkhaila, Mohammed Idrees Khan, Mitesh Patel, Mousa Alreshidi, Afrasim Moin, Ritu Singh, Mejdi Snoussi y Mohd Adnan. 2021. Innovations in nanoscience for the sustainable development of food and agriculture with implications on health and environment. *Science of The Total Environment*, 768: 144990. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144990>.
- Awet, T. T., Y. Kohl, F. Meier, S. Straskraba, A. L. Grün, T. Ruf, C. Jost, R. Drexel, E. Tunc y C. Emmerling. 2018. Effects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil. *Environmental Sciences Europe*, 30(1): 1-10. <https://doi.org/10.1186/S12302-018-0140-6/FIGURES/3>. <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-018-0140-6>.
- Azhar, Wardah, Ali Raza Khan, Noor Muhammad, Bohan Liu, Ge Song, Akhlaq Hussain, Muhammad Umair Yasin, Sulaiman Khan, Raheel Munir y Yinbo Gan. 2020. Ethylene mediates CuO NP-induced ultrastructural changes and oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* leaves. *Environmental Science: Nano*, 7(3): 938-953. <https://doi.org/10.1039/C9EN01302D>. <http://dx.doi.org/10.1039/C9EN01302D>.
- Babu, E. R., Nagaraja C. Reddy, Atul Babbar, A. Chandrashekar, Raman Kumar, Pard-

- eep Singh Bains, Majed Alsubih, Saiful Islam, Sanjeev Kumar Joshi, Achmad Rizal y Muhammad Imam Ammarullah. 2024. Characteristics of pulsating heat pipe with variation of tube diameter, filling ratio, and SiO₂ nanoparticles: bio-medical and engineering implications. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55: 104065. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104065>.
- Berger, Mauricio Sebastian y Wilson Engelmann. 2025. Nanotecnología en agricultura: jurisdicciones epistémicas y desafíos regulatorios en Argentina y Brasil. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 18(34): e69823. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69823>.
- Bombin, S., M. LeFebvre, J. Sherwood, Y. Xu, Y. Bao y K. M. Ramonell. 2015. Developmental and reproductive effects of iron oxide nanoparticles in *Arabidopsis thaliana*. *Int. J. Mol. Sci.*, 16(10): 24174-93. <https://doi.org/10.3390/ijms161024174>.
- Camara, Marcela Candido, Estefânia Vangelie Ramos Campos, Renata Aparecida Monteiro, Anderson do Espirito Santo Pereira, Patricia Luiza de Freitas Proença y Leonardo Fernandes Fraceto. 2019. Development of stimuli-responsive nano-based pesticides: emerging opportunities for agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*, 17(1): 100. <https://doi.org/10.1186/s12951-019-0533-8>.
- Cao, Jiamei, Yongqiang Feng, Baoyong Liu y Hongguang Li. 2018. Carbon skeleton doped with Co, N, S and P as efficient electrocatalyst for oxygen evolution reaction. *Science China Materials*, 61(5): 686-696. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9149-y>.
- Castillo-Henríquez, Luis, Karla Alfaro-Aguilar, Jeisson Ugalde-Álvarez, Laura Vega-Fernández, Gabriela Montes de Oca-Vásquez y José Roberto Vega-Baudrit. 2020. Green synthesis of gold and silver nanoparticles from plant extracts and their possible applications as antimicrobial agents in the agricultural area. *Nanomaterials*, 10(9): 1763. <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/9/1763>.
- Chavan, Sangeeta y Vigneshwaran Nadanathangam. 2019. Effects of nanoparticles on plant growth-promoting bacteria in Indian agricultural soil. *Agronomy*, 9(3): 140. <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/3/140/htm>.
- Chen, Sensen, Ying Teng, Yongming Luo, Eiko Kuramae y Wenjie Ren. 2024. Threats to the soil microbiome from nanomaterials: a global meta and machine-learning analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 188: 109248. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109248>.
- Dam, Paulami, M. Paret, Rittick Mondal y A. Mandal. 2022. Advancement of noble metallic nanoparticles in agriculture — A promising future: a review. *Pedosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.026>.
- Dey, Swarnali, Nilanjana Ghosh, Shreya Nath, G. Gopal, Surupa Paul, Amitava Mukherjee, Subhabrata Paul y Rita Kundu. 2024. Application of multi-metallic nanoparticles in agriculture: the more, the better? *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103238>.
- Fatima, Faria, Arshya Hashim y Sumaiya Anees. 2021. Efficacy of nanoparticles as nanofertilizer production: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(2): 1292-1303. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11218-9>.
- Fernández-Luqueño, Fabián, Ileana Vera-Reyes y Sandra Loera-Serna. 2022. Presen-

- tación. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(30): 1e-7e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69784>.
- Francis, D., Abdelmoneim Abdalla, W. Mahakham, Ajit Sarmah y Zienab Ahmed. 2024. Interaction of plants and metal nanoparticles: exploring its molecular mechanisms for sustainable agriculture and crop improvement. *Environment International*, 190: 108859. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108859>.
- Frenk, Sammy, Tal Ben-Moshe, Ishai Dror, Brian Berkowitz y Dror Minz. 2013. Effect of metal oxide nanoparticles on microbial community structure and function in two different soil types. *PLoS One*, 8(12): e84441. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0084441>.
- Geetha, P., M. S. Latha, Saumya S. Pillai, B. Deepa, K. Santhosh Kumar y Mathew Koshy. 2016. Green synthesis and characterization of alginate nanoparticles and its role as a biosorbent for Cr(VI) ions. *Journal of Molecular Structure*, 1105: 54-60. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022286015303227>.
- Geisler-Lee, Jane, Marjorie Brooks, Jacob R. Gerfen, Qiang Wang, Christin Fotis, Anthony Sparer, Xingmao Ma, R. Howard Berg y Matt Geisler. 2014. Reproductive toxicity and life history study of silver nanoparticle effect, uptake and transport in *Arabidopsis thaliana*. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 4(2): 301-318. <https://doi.org/10.3390/NANO4020301>.
- Geisler-Lee, Jane, Wang Qiang, Yao Ying, Zhang Wen, Geisler Matt, Li Kungang, Huang Ying, Chen Yongsheng, Kolmakov Andrei y Xingmao Ma. 2013. Phytotoxicity, accumulation and transport of silver nanoparticles by *Arabidopsis thaliana*. *Nanotoxicology*, 7(3): 323-337. <https://doi.org/10.3109/17435390.2012.658094>.
- Geng, Min, Linlin Li, Mingjun Ai, Jun Jin, Die Hu y Kai Song. 2022. Recent advances in metal-based nanoparticle-mediated biological effects in *Arabidopsis thaliana*: a mini review. *Materials*, 15(13): 4539-4539. <https://doi.org/10.3390/MA15134539>. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/13/4539/htm>.
- Grün, Anna Lena, Werner Manz, Yvonne Lydia Kohl, Florian Meier, Susanne Straskraba, Carsten Jost, Roland Drexel y Christoph Emmerling. 2019. Impact of silver nanoparticles (AgNP) on soil microbial community depending on functionalization, concentration, exposure time and soil texture. *Environmental Sciences Europe*, 31(1): 1-22. <https://doi.org/10.1186/S12302-019-0196-Y/TABLES/4>.
- Harshiny, Muthukumar, Chandrasekaran Nivedhini Iswarya y Manickam Matheswaran. 2015. Biogenic synthesis of iron nanoparticles using *Amaranthus dubius* leaf extract as a reducing agent. *Powder Technology*, 286: 744-749. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.021>.
- Holland, C. y J. Jez. 2018. *Arabidopsis*: the original plant chassis organism. *Plant Cell Reports*, 37: 1359-1366. <https://doi.org/10.1007/s00299-018-2286-5>.
- Jain, Aditi, Ranjan Shivendu, Dasgupta Nandita y Chidambaram and Ramalingam. 2018. Nanomaterials in food and agriculture: an overview on their safety concerns and regulatory issues. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(2): 297-317. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1160363>.

- Jamkhande, Prasad Govindrao, Namrata W. Ghule, Abdul Haque Bamer y Mohan G. Kalaskar. 2019. Metal nanoparticles synthesis: an overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 53: 101174. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101174>.
- Jin, Yujian, Xiaoji Fan, Xingxing Li, Zhenyan Zhang, Liwei Sun, Z. Fu, M. Lavoie, Xiangliang Pan y H. Qian. 2017. Distinct physiological and molecular responses in *Arabidopsis thaliana* exposed to aluminum oxide nanoparticles and ionic aluminum. *Environmental pollution*, 228: 517-527. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.073>.
- Joško, Izabela, Patryk Oleszczuk, Joanna Dobrzyńska, Barbara Futa, Jolanta Joniec y Ryszard Dobrowolski. 2019. Long-term effect of ZnO and CuO nanoparticles on soil microbial community in different types of soil. *Geoderma*, 352: 204-212. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2019.06.010>.
- Judy, Jonathan D., Jason M. Unrine, William Rao y Paul M. Bertsch. 2012. Bioaccumulation of gold nanomaterials by manduca sextathrough dietary uptake of surface contaminated plant tissue. *Environmental Science & Technology*, 46(22): 12672-12678. <https://doi.org/10.1021/es303333w>.
- Kang, Minghui, Haolin Wu, Wenyu Liu, Mingjia Zhu, Yu Han, Wei Liu, Chun-Lin Chen, Kangqun Yin, Yusen Zhao, Zheng Yan, Huanhuan Liu, Shangling Lou, Y. Zan y Jianquan Liu. 2022. The pan-genome and local adaptation of *Arabidopsis thaliana*. *Nature Communications*, 14. <https://doi.org/10.1101/2022.12.18.520013>.
- Kaveh, Rashid, Yue Sheng Li, Sibia Ranjbar, Rouzbeh Tehrani, Christopher L. Brueck y Benoit Van Aken. 2013. Changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression in response to silver nanoparticles and silver ions. *Environmental Science and Technology*, 47(18): 10637-10644. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es402209w>.
- Ke, Mingjing, Qian Qu, W. J. G. M. Peijnenburg, Xingxing Li, Meng Zhang, Zhenyan Zhang, Tao Lu, Xiangliang Pan y Haifeng Qian. 2018a. Phytotoxic effects of silver nanoparticles and silver ions to *Arabidopsis thaliana* as revealed by analysis of molecular responses and of metabolic pathways. *Science of The Total Environment*, 644: 1070-1079. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.061>.
- Ke, Mingjing, Qian Qu, W. Peijnenburg, Xingxing Li, Meng Zhang, Zhenyan Zhang, Tao Lu, Xiangliang Pan y H. Qian. 2018b. Phytotoxic effects of silver nanoparticles and silver ions to *Arabidopsis thaliana* as revealed by analysis of molecular responses and of metabolic pathways. *The Science of The Total Environment*, 644: 1070-1079. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.061>.
- Khan, Shams Tabrez, Syed Farooq Adil, Mohammed Rafi Shaik, Hamad Z. Alkhatlan, Merajuddin Khan y Mujeeb Khan. 2021. Engineered nanomaterials in soil: their impact on soil microbiome and plant health. *Plants*, 11(1): 109. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11010109>.
- Kibbey, Tohren C. G. y Keith A. Strevett. 2019. The effect of nanoparticles on soil and rhizosphere bacteria and plant growth in lettuce seedlings. *Chemosphere*, 221: 703-707. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.01.091>.
- Kim, Sun-Jung y Bong Hyun Chung. 2016. Antioxidant activity of levan coated cerium

- oxide nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 150: 400-407. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.021>.
- Klepikova, A., A. Kasianov, E. Gerasimov, M. Logacheva y A. Penin. 2016. A high resolution map of the *Arabidopsis thaliana* developmental transcriptome based on RNA-seq profiling. *The Plant Journal : for cell and molecular biology*, 88 6: 1058-1070. <https://doi.org/10.1111/tpj.13312>.
- Koch, M. 2018. The plant model system *Arabidopsis* set in an evolutionary, systematic y spatio-temporal context. *Journal of Experimental Botany*, 70(1): 55-67. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery340>.
- Kumar, Vineet, P. Guleria, Vinay Kumar y S. Yadav. 2013. Gold nanoparticle exposure induces growth and yield enhancement in *Arabidopsis thaliana*. *The Science of The Total Environment*, 461-462: 462-468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.018>.
- Landa, Premysl, P. Dytrych, Sylva Přerostová, Š Petrová, Radomira Vaňková y T. Vanek. 2017. Transcriptomic response of *Arabidopsis thaliana* exposed to CuO nanoparticles, bulk material, and ionic copper. *Environmental Science & Technology*, 51 18: 10814-10824. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02265>.
- Landa, Premysl, Radomira Vankova, Jana Andrlova, Jan Hodek, Petr Marsik, Helena Storchova, Jason C. White y Tomas Vanek. 2012. Nanoparticle-specific changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression after exposure to ZnO, TiO₂, and fullerene soot. *Journal of Hazardous Materials*, 241-242: 55-62. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2012.08.059>.
- Lee, Chang Woo, Shaily Mahendra, Katherine Zodrow, Dong Li, Yu Chang Tsai, Janet Braam y Pedro J. J. Álvarez. 2010. Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(3): 669-675. <https://doi.org/10.1002/ETC.58>.
- Li, Xingxing, Mingjing Ke, Meng Zhang, W. Peijnenburg, Xiaoji Fan, Jiahui Xu, Zhenyan Zhang, Tao Lu, Z. Fu y H. Qian. 2018a. The interactive effects of diclofop-methyl and silver nanoparticles on *Arabidopsis thaliana*: growth, photosynthesis and antioxidant system. *Environmental Pollution*, 232: 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.034>.
- Li, Xingxing, Mingjing Ke, Meng Zhang, W. J. G. M. Peijnenburg, Xiaoji Fan, Jiahui Xu, Zhenyan Zhang, Tao Lu, Zhengwei Fu y Haifeng Qian. 2018b. The interactive effects of diclofop-methyl and silver nanoparticles on *Arabidopsis thaliana*: growth, photosynthesis and antioxidant system. *Environmental Pollution*, 232: 212-219. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2017.09.034>.
- Liu, Jia, Philip C. Williams, Jane Geisler-Lee, Boyd M. Goodson, Masoud Fakharifar, Meisam Peiravi, Da Chen, David A. Lightfoot y Max E. Gemeinhardt. 2018. Impact of wastewater effluent containing aged nanoparticles and other components on biological activities of the soil microbiome, *Arabidopsis* plants and earthworms. *Environmental Research*, 164: 197-203. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2018.02.006>.
- Liu, Jia, Philip C. Williams, Boyd M. Goodson, Jane Geisler-Lee, Masoud Fakharifar y Max E. Gemeinhardt. 2019. TiO₂ nanoparticles in irrigation water mitigate impacts of aged Ag nanoparticles on soil microorganisms, *Arabidopsis thaliana*

- plants, and *Eisenia fetida* earthworms. *Environmental Research*, 172: 202-215. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2019.02.010>.
- Ma, Chuanxin, Sudesh Chhikara, Baoshan Xing, Craig Musante, Jason C. White y Om Parkash Dhankher. 2013. Physiological and molecular response of *Arabidopsis thaliana* (L.) to nanoparticle cerium and indium oxide exposure. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(7): 768-778. <https://doi.org/10.1021/sc400098h>.
- Macůrková, A., L. Maryška, B. Jindřichová, T. Drobníková, B. Vrchotová, R. Pospíchalová, K. Záruba, T. Hubáček, J. Siegel, L. Burketová, P. Lovecká y O. Valentová. 2021. Effect of round-shaped silver nanoparticles on the genetic and functional diversity of soil microbial community in soil and “soil-plant” systems. *Applied Soil Ecology*, 168: 104165. <https://doi.org/10.1016/J.APSSOIL.2021.104165>.
- Maity, D., U. Gupta y S. Saha. 2022. Biosynthesized metal oxide nanoparticles for sustainable agriculture: next-generation nanotechnology for crop production, protection and management. *Nanoscale*. <https://doi.org/10.1039/d2nr03944c>.
- Mathew, Mabel Maria y Kalika Prasad. 2021. Model systems for regeneration: *Arabidopsis*. *Development* 148. <https://doi.org/10.1242/dev.195347>.
- Milewska-Hendel, Anna, Maciej Zubko, Danuta Stróż y Ewa U. Kurczyńska. 2019. Effect of nanoparticles surface charge on the *Arabidopsis thaliana* (L.) roots development and their movement into the root cells and protoplasts. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(7). <https://doi.org/10.3390/ijms20071650>.
- Mu, Dan, Yinghui Liang, Wenhui Zhang y Yucheng Wang. 2018. Investigation on tree molecular genome of *Arabidopsis thaliana* for Internet of Things. *IEEE Access*, 6: 67688-67698. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2877411>.
- Nair, Prakash M. Gopalakrishnan y Ill Min Chung. 2017. Regulation of morphological, molecular and nutrient status in *Arabidopsis thaliana* seedlings in response to ZnO nanoparticles and Zn ion exposure. *Science of The Total Environment*, 575: 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.017>.
- Parashar, Srishti, Sheetal Raj, Priyanka Srivastava y Abhishek Kumar Singh. 2024. Comparative toxicity assessment of selected nanoparticles using different experimental model organisms. *Journal of Pharmacological and Toxicological Methods*, 130: 107563. <https://doi.org/10.1016/j.vascn.2024.107563>.
- Peyrot, Caroline, Kevin J. Wilkinson, Mélanie Desrosiers y Sébastien Sauvé. 2013. Effects of silver nanoparticles on soil enzyme activities with and without added organic matter. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(1): 115-125. <https://doi.org/10.1002/etc.2398>.
- Qian, Haifeng, Xiaofeng Peng, Xiao Han, Jie Ren, Liwei Sun y Zhengwei Fu. 2013. Comparison of the toxicity of silver nanoparticles and silver ions on the growth of terrestrial plant model *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Environmental Sciences*, 25(9): 1947-1956. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60301-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60301-5).
- Racca, Luisa, Marta Canta, Bianca Dumontel, Andrea Ancona, Tania Limongi, Nadia Garino, Marc, Laurenti, Giancarlo Canavese y Valentina Cauda. 2018. 12-Zinc oxide nanostructures in biomedicine. En *Smart Nanoparticles for Biomedicine*, edited by Gianni Ciofani, Elsevier, 171-187.
- Rajput, Vishnu D., Tatiana Minkina, Morteza Feizi, Arpna Kumari, Masudulla Khan,

- Saglara Mandzhieva, Svetlana Sushkova, Hassan El-ramady, Krishan K. Verma, Abhishek Singh, Eric D. van Hullebusch, Rupesh Kumar Singh, Hanuman Singh Jatav y Ravish Choudhary. 2021. Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. *Biology*, 10(8): 791. <https://www.mdpi.com/2079-7737/10/8/791/htm>.
- Rippner, Devin A., Peter G. Green, Thomas M. Young y Sanjai J. Parikh. 2018. Dissolved organic matter reduces CuO nanoparticle toxicity to duckweed in simulated natural systems. *Environmental Pollution*, 234: 692-698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.014>.
- Rohela, Gulab Khan, Pawan Saini, Danishta Aziz, Summira Rafiq, Phanikanth Jogam y Baohong Zhang. 2024. Nanoparticles as elicitors and stimulators for plant tissue culture, transgenics, and genome editing: a comprehensive review. *Industrial Crops and Products*, 222: 120097. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120097>.
- Ruales-Lonfat, C., J. F. Barona, A. Sienkiewicz, M. Bensimon, J. Vélez-Colmenares, N. Benítez y C. Pulgarín. 2015. Iron oxides semiconductors are efficient for solar water disinfection: a comparison with photo-Fenton processes at neutral pH. *Applied Catalysis B: Environmental*, 166-167: 497-508. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.12.007>.
- Ryu, Chung-Hyeon, Sung-Jun Joo y Hak-Sung Kim. 2016. Two-step flash light sintering of copper nanoparticle ink to remove substrate warping. *Applied Surface Science*, 384: 182-191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.05.025>.
- Saleem, Haleema y Syed Javaid Zaidi. 2020. Recent developments in the application of nanomaterials in agroecosystems. *Nanomaterials*, 10(12): 2411. <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/12/2411>.
- Santás-Miguel, V., M. Arias-Estévez, Andrés Rodríguez-Seijo y D. Arenas-Lago. 2023. Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination. *Environmental pollution*: 122222. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122222>.
- Shull, Timothy E., Jasmina Kurepa y Jan A. Smalle. 2019. Anatase TiO₂ nanoparticles induce autophagy and chloroplast degradation in thale cress (*Arabidopsis thaliana*). *Environmental Science and Technology*, 53(16): 9522-9532. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b01648>.
- Siegel, Jakub, Kamil Záruba, Václav Švorčík, Kristýna Kroumanová, Lenka Burketová y Jan Martinec. 2018. Round-shape gold nanoparticles: effect of particle size and concentration on *Arabidopsis thaliana* root growth. *Nanoscale Research Letters*, 13(1): 95. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2510-9>.
- Singh, Pooja, Vanya Nayak, Ranjana Verma, Arunadevi Natarajan, Jay Singh, Shyam Pandey y Kshitiji R. B. Singh. 2024. Comprehensive perspective of sustainable nanostructured metal and metal oxide towards agriculture utility for precision farming. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103457>.
- Somssich, Marc. 2022. The dawn of plant molecular biology: how three key methodologies paved the way. *Current Protocols*, 2. <https://doi.org/10.1002/cpz1.417>.

- Sosan, Arifa, D. Svistunenko, Darya Straltsova, Katsiaryna Tsiurkina, I. Smolich, T. Lawson, S. Subramaniam, V. Golovko, David Anderson, A. Sokolik, Ian Colbeck y V. Demidchik. 2016a. Engineered silver nanoparticles are sensed at the plasma membrane and dramatically modify the physiology of *Arabidopsis thaliana* plants. *The Plant Journal : for cell and molecular biology*, 85(2): 245-257. <https://doi.org/10.1111/tpj.13105>.
- Sosan, Arifa, Dimitri Svistunenko, Darya Straltsova, Katsiaryna Tsiurkina, Igor Smolich, Tracy Lawson, Sunitha Subramaniam, Vladimir Golovko, David Anderson, Anatoliy Sokolik, Ian Colbeck y Vadim Demidchik. 2016b. Engineered silver nanoparticles are sensed at the plasma membrane and dramatically modify the physiology of *Arabidopsis thaliana* plants. *The Plant Journal*, 85(2): 245-257. <https://doi.org/10.1111/TPJ.13105>.
- Syed, Baker, Nagendra M. N. Prasad y Sreedharamurthy Satish. 2016. Endogenic mediated synthesis of gold nanoparticles bearing bactericidal activity. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 4(3): 162-166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmau.2016.01.004>.
- Syu, You-yu, Jui-Hung Hung, Jui-Chang Chen y Huey-wen Chuang. 2014. Impacts of size and shape of silver nanoparticles on *Arabidopsis* plant growth and gene expression. *Plant Physiology and Biochemistry*, 83: 57-64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.07.010>.
- Szymańska, Renata, Karolina Kołodziej, Ireneusz Ślesak, Paulina Zimak-Piekarczyk, Aleksandra Orzechowska, Michał Gabruk, Andrzej Zadło, Iwona Habina, Wiesław Knap, Květoslava Burda y Jerzy Kruk. 2016. Titanium dioxide nanoparticles (100-1000 mg/l) can affect vitamin E response in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Pollution*, 213: 957-965. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.03.026>.
- Tang, Yulin, Rong He, Jian Zhao, Guangli Nie, Lina Xu y Baoshan Xing. 2016. Oxidative stress-induced toxicity of CuO nanoparticles and related toxicogenomic responses in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Pollution*, 212: 605-614. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.03.019>.
- Tian, Liyan, Jupei Shen, Guoxin Sun, Bin Wang, Rong Ji y Lijuan Zhao. 2020. Foliar application of SiO₂ nanoparticles alters soil metabolite profiles and microbial community composition in the pakchoi (*Brassica chinensis* L.) rhizosphere grown in contaminated mine soil. *Environmental Science and Technology*, 54(20): 13137-13146. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.0c03767>.
- Tumburu, L., C. P. Andersen, P. T. Rygiewicz y J. R. Reichman. 2017. Molecular and physiological responses to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles in *Arabidopsis*. *Environ. Toxicol. Chem.*, 36(1): 71-82. <https://doi.org/10.1002/etc.3500>.
- Ulhassan, Zaid, I. Khan, M. Hussain, Ali Raza Khan, Y. Hamid, S. Hussain, S. Allakhverdiev y Weijun Zhou. 2022. Efficacy of metallic nanoparticles in attenuating the accumulation and toxicity of chromium in plants: current knowledge and future perspectives. *Environmental pollution*: 120390. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120390>.
- Vaňková, R., P. Landa, R. Podlipná, P. Dobrev, Sylva Přerostová, L. Langhansová, A.

- Gaudinova, K. Mořková, Vojtech Knirsch y T. Vanek. 2017. ZnO nanoparticle effects on hormonal pools in *Arabidopsis thaliana*. *The Science of The Total Environment* 593-594: 535-542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.160>.
- Vankova, Radomira, Premysl Landa, Radka Podlipna, Petre I. Dobrev, Sylva Prerostova, Lenka Langhansova, Alena Gaudinova, Katerina Motkova, Vojtech Knirsch y Tomas Vanek. 2017. ZnO nanoparticle effects on hormonal pools in *Arabidopsis thaliana*. *Science of The Total Environment*, 593-594: 535-542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.160>.
- Wang, Zhenyu, Lina Xu, Jian Zhao, Xiangke Wang, J. White y B. Xing. 2016. CuO nanoparticle interaction with *Arabidopsis thaliana*: toxicity, parent-progeny transfer, and gene expression. *Environmental science & technology*, 50(11): 6008-6016. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01017>.
- Wu, Honghong, Nicholas Tito y Juan P. Giraldo. 2017. Anionic cerium oxide nanoparticles protect plant photosynthesis from abiotic stress by scavenging reactive oxygen species. *ACS Nano*, 11(11): 11283-11297. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsnano.7b05723>.
- Xie, Changjian, Zhiling Guo, Peng Zhang, Jie Yang, Junzhe Zhang, Yuhui Ma, Xiao He, Iseult Lynch y Zhiyong Zhang. 2022. Effect of CeO₂ nanoparticles on plant growth and soil microcosm in a soil-plant interactive system. *Environmental Pollution*, 300: 118938-118938. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.118938>.
- Xu, Nuohan, Jian Kang, Yangqing Ye, Qi Zhang, Mingjing Ke, Yufei Wang, Zhenyan Zhang, Tao Lu, W. J. G. M. Peijnenburg, Penuelas Josep, Guanjuan Bao y Haifeng Qian. 2022. Machine learning predicts ecological risks of nanoparticles to soil microbial communities. *Environmental Pollution*, 307: 119528-119528. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.119528>.
- Yang, S., R. Yin, C. Wang, Y. Yang y J. Wang. 2023. Phytotoxicity of zinc oxide nanoparticles and multi-walled carbon nanotubes, alone or in combination, on *Arabidopsis thaliana* and their mutual effects on oxidative homeostasis. *PLoS One*, 18(2): e0281756. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281756>.
- Yaschenko, Anna, Jose Alonso y A. Stepanova. 2024. *Arabidopsis* as a model for translational research. *The Plant Cell*. <https://doi.org/10.1093/plcell/koae065>.
- Yoon, Hakwon, Yu-Gyeong Kang, Yoon-Seok Chang y Jae-Hwan Kim. 2019. Effects of Zerovalent iron nanoparticles on photosynthesis and biochemical adaptation of soil-grown *Arabidopsis thaliana*. *Nanomaterials*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/nano9111543>.
- Zango, Zakariyya Uba, Abdurrahman Garba, Fatimah Bukola Shittu, Saifullahi Shehu Imam, Abdurrashid Haruna, Muttaqa Uba Zango, Ismael A. Wadi, Usman Bello, Haruna Adamu, Basem E. Keshta, Dmitry Olegovich Bokov, Omirserik Baigenzhenov y Ahmad Hosseini-Bandegharai. 2025. A state-of-the-art review on green synthesis and modifications of ZnO nanoparticles for organic pollutants decomposition and CO₂ conversion. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17: 100588. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100588>.