



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

**LAS NANOPARTÍCULAS EN LA
AGRICULTURA: UNA REVISIÓN**

TESINA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
AGRÓNOMO FITOTECNISTA

PRESENTA

LITZI VIANNEY ESQUIVEL JIMÉNEZ

DIRECTOR DE TESIS

DELFINA DE JESÚS PÉREZ LÓPEZ

ANDRÉS GONZÁLEZ HUERTA

CERRILLO PIEDRAS BLANCAS, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2025

INDICE GENERAL

	PÁG.
AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIAS	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
I. RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
II. IMPORTANCIA DE LA TEMÁTICA	1
2.1. Objetivo General	2
2.2. Objetivos específicos	2
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
IV. METODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EMPLEADAS	4
4.1. Localización	4
4.2. Investigación documental	4
V. DESARROLLO TEMÁTICO	6
5.1. Importancia de las nanopartículas (nanomateriales)	6
5.2. Concepto de nanopartículas	7
5.3. Clasificación de nanopartículas (nanomateriales)	8
5.3.1. NPs basadas en carbono	8
5.3.2. NPs de metal	9

5.3.3. NPs de cerámica	9
5.3.4. NPs de semiconductores	9
5.3.5. NPs poliméricas	10
5.3.6. NPs basadas en lípidos	10
5.3.7 nanomateriales orgánicos consistentes en nanoencapsulados y nanocompuestos	10
5.4. Uso de las nanopartículas en la agricultura	12
5.5. Aplicación de nanopartículas en Agricultura de precisión	27
5.6. Síntesis de nanopartículas	28
5.7. Biosíntesis de nanopartículas de extractos de plantas	29
5.8. Efecto de los nanomateriales sobre los microorganismos del suelo	41
5.9. Efectos toxicológicos en los seres vivos	44
VI. CONCLUSIONES	47
VII. REFLEXIONES	49
VIII. REFERENCIAS DE CONSULTA	53

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadros:	Pág.
1. Diferentes tipos de nanopartículas utilizadas como nanofertilizantes, respuesta.	19
2. Nanopartículas utilizadas en el desarrollo de nanosensores para el sector agrícola	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras:	Pág.
1. Empleo de la nanotecnología en la industria alimentaria.	4
2. Vías de absorción y traslocación de las nanopartículas en las plantas	25

Las nanopartículas en la agricultura: una revisión

Litzi Vianney Esquivel Jiménez

Investigación presentada como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Directores de tesis: Dra. Delfina de Jesús Pérez López y Andrés González Huerta. Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma del Estado de México. A.P. 435. Tel. y Fax: +52(722)296 5518. Ext.60382.

RESUMEN

Esta revisión documental pretende tener un marco de referencia del estado actual de la nanotecnología en la agricultura: desarrollos, aplicaciones y riesgos conocidos, así como una descripción general de los tipos, métodos de síntesis, propiedades de las nanopartículas, las cuales son materiales diminutos que miden de 0.1 a 100 nm. Se clasifican en diferentes clases, formas o tamaños. La reducción de alimentos en todo el mundo y el crecimiento constante de la población, combinados con los problemas ambientales causados por la erosión genética y el uso de productos químicos, es necesario usar prácticas agrícolas sustentables, como el manejo de los nanomateriales (NMs), aún existen aspectos desconocidos de los efectos de la nanotecnología, por ejemplo, sobre la bioseguridad, los efectos adversos, el destino y la reactividad biológica de los nanomateriales una vez que se introducen en el medio ambiente. El daño que pueden causar a los agroecosistemas, a la salud humana y al medio ambiente, aún no se comprende completamente.

Nanoparticles in agriculture: a review

Litzi Vianney Esquivel Jiménez

Research presented as a requirement to obtain the degree of Agronomist Phytotechnician Engineer at the Autonomous University of the State of Mexico.

Thesis directors: Dr. Delfina de Jesús Pérez López and Andrés González Huerta. Center for Research and Advanced Studies in Plant Breeding. Faculty of Agricultural Sciences. Autonomous University of the State of Mexico. Tel. and Fax: +52(722)296 5518. Ext.60382.

ABSTRACT.

This documentary review seeks to serve as a frame of reference for the state of nanotechnology in agriculture: developments, applications and known risks, as well as a general description of the different types, synthesis methods, characterizations, properties of nanoparticles, which are tiny materials that have size ranges from 1 to 100 nm. They can be classified into different classes according to their properties, shapes or sizes.

Current rates of food reduction around the world, coupled with steady population growth, combined with environmental problems caused by genetic erosion and chemical use, have brought to the forefront the need for sustainable improvements in agricultural practice, which could be addressed by employing nanomaterials (NMs).

However, there are still unknown aspects related to the effects of nanotechnology, for example, there is limited knowledge about the biosafety, adverse effects, fate and biological reactivity of nanomaterials once they are introduced into the environment. The damage they can cause to agroecosystems, human health and the environment is not yet fully understood.

II. IMPORTANCIA DE LA TEMÁTICA

El incremento de la población a nivel mundial, ha reducido las áreas dedicadas a la producción agrícola. Pérez *et al.* (2018) reportaron que el efecto de cambio climático y el estrés biótico y abiótico causan daños significativos a la producción agrícola en todo el mundo, por ello se está buscando el desarrollo de nuevas técnicas agrícolas sostenibles que ayuden a incrementar el rendimiento en los cultivos de importancia económica. Se espera que la población mundial crezca hasta 9.7 mil millones para 2050, esto traerá como consecuencia un aumento del 70 por ciento en la demanda de alimentos. Esto requiere esfuerzos compartidos para apoyar una agricultura sostenible y al mismo tiempo conservar los recursos naturales y reducir los efectos adversos sobre el medio ambiente (Fenu y Maridina, 2020). Una alternativa es el uso de la nanotecnología.

La nanotecnología se puede definir como la fabricación de materiales, estructuras, dispositivos y sistemas funcionales a través del control y ensamblado de la materia a la escala del nanómetro (de 0.1 a 100 nanómetros, del átomo) que es la unidad de medida de cosas muy pequeñas denominados nanomateriales, como consecuencia surge la nanoquímica, nanoelectrónica, nanomedicina o nanobiotecnología; o de objetos tales como nanopartículas, nanotubos, nanoimanes o nanomotores (Peters *et al.*, 2014; Mendoza y Rodríguez, 2007).

Los nanomateriales, incluyen metales, óxidos metálicos, arcilla y materiales totalmente de carbono, así como nanomateriales orgánicos consistentes en nanoencapsulados y nanocompuestos. Los nanomateriales se utilizan en la alimentación para evitar el deterioro microbiano de los alimentos envasados, mejorar los colores, sabores, textura y aumentar la biodisponibilidad de vitaminas y minerales (Ojeda *et al.*, 2019; Cushen *et al.*, 2012; Chaudhry *et al.*, 2008).

En la agricultura las nanopartículas se usan en la germinación y la productividad de los cultivos como fuentes de fertilizantes y resistencia sistémica, con la finalidad de garantizar la sostenibilidad económica y el uso eficiente de los recursos genéticos en la producción agrícola (Galindo *et al.*, 2022; Thakur *et al.*, 2019). En la agricultura de precisión se han usado los nanoplaguicidas y los nanofertilizantes, estos últimos se han usado en maíz (*Zea mays* L.; Kumar y Meesala, 2025), trigo (*Triticum aestivum* L.; Priyanshi *et al.*, 2025) y pimiento morrón (*Capsicum annum var. annum* (Rocha-Santillano *et al.*, 2024). La efectividad de la nano urea en combinación con fertilizantes inorgánicos ha sido reportado con resultados similares (Singh *et al.*, 2022; Rawate *et al.*, 2022); en general las nanopartículas han contribuido a incrementar el rendimiento en una forma sostenible. Sin embargo, el acceso al mercado y la aceptación de los nuevos productos no es total debido a que el conocimiento sobre sus efectos tóxicos y la legislación de los nanomateriales que tenemos actualmente es incipiente. Por lo que los objetivos de presente trabajo documental son:

1.1. Objetivo General

Integrar información existente de diversas fuentes para obtener un conocimiento profundo y panorámico de la aplicación, síntesis, clasificación y efectos de las nanopartículas en la agricultura y la agroindustria.

1.2. Objetivos específicos

Analizar la información documental adquirida en artículos científicos, capítulos de libro, así como libros especializados acerca de nanopartículas usadas en la agricultura.

Sintetizar las ideas de los diversos autores para visualizar el uso actual de las nanopartículas en la agricultura e industria alimentaria.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La agricultura en la actualidad opera en la delicada intersección de la protección del medioambiente y productividad, cada vez más difícil de mantener. Los agricultores se enfrentan a una avalancha de problemas agrícolas. Además de luchar contra los problemas de la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad, tienen que encontrar la manera de adaptarse a fenómenos meteorológicos cada vez más extremos y a las alteraciones en las condiciones de cultivo que el cambio climático provoca en la agricultura. Asimismo, tienen que satisfacer las nuevas preferencias de los consumidores con una producción de mayor calidad y más sostenible.

La combinación de estos factores crea un círculo vicioso que pone en riesgo la seguridad alimentaria, la disminución en la producción de alimentos, la escasez de recursos y la inestabilidad generada por el cambio climático, lo que contribuyen a un aumento de la desnutrición y la pobreza en el país.

Se requiere una transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles y adaptadas al nuevo escenario climático, lo cual implica la integración de tecnología, en este caso nanopartículas, las cuales son cruciales en la agricultura por su capacidad para mejorar la eficiencia de los fertilizantes y pesticidas, aumentar la absorción de nutrientes, estimular el crecimiento vegetal y mejorar la resistencia de las plantas al estrés biótico y abiótico. Su uso también favorece la sostenibilidad al reducir el desperdicio de insumos, minimizar el impacto ambiental, y permite el desarrollo de sensores para la detección temprana de enfermedades. Sin embargo, se debe investigar y controlar sus posibles efectos en el medio ambiente y la salud humana.

IV. METODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EMPLEADAS

4.1. Localización

Para la realización de este trabajo se llevó a cabo una revisión bibliográfica de las nuevas técnicas de la nanotecnológica aplicada a la agricultura y la industria alimentaria, centrándose dentro de ésta en los materiales de contacto con el alimento para su producción. Así mismo, se ha hecho una búsqueda sobre la obtención de las nanopartículas de origen vegetal, los efectos toxicológicos de las nanopartículas contenidas en los nuevos alimentos y el impacto que ha tenido en el medio ambiente.

4.2. Investigación documental

Se analizó la información en artículos científicos acerca de la fabricación de las nanopartículas a partir de materiales, estructuras, dispositivos y sistemas funcionales a una escala del nanómetro. Se describió la clasificación de las nanopartículas según su morfología, tamaño y propiedades químicas, como a la reactividad, dureza, conductividad, solubilidad, velocidad de absorción y biodisponibilidad.

Este tipo de investigación documental, se integró y se organizó de acuerdo con la información teórica existente sobre el tema: Donde primero se hizo una decodificación, posteriormente se llevó a cabo una comprensión de la revisión de literatura científica, en la cual se identificó, se resumieron las ideas de los autores y se registraron detalles, secuencias, relaciones causa-efecto, con el propósito de analizar la información y posteriormente sintetizar las ideas de las citas consultadas. Esta etapa comprende la interpretación, retención, comprensión-organización y valoración. La interpretación se formó de las ideas centrales de los autores consultados se predijeron resultados y se dedujeron las conclusiones del trabajo escrito. En la

Retención se buscó desde conceptos fundamentales, datos que respondan a preguntas específicas, así como datos aislados y coordinados, en la etapa comprensión-organización, se establecieron secuencias e instrucciones y, por último, una valoración para captar el sentido de lo que refleja el autor, se establecieron relaciones causa-efecto. Consecuentemente se realizó una Internalización donde una vez comprendida la lectura, se obtuvo la información para organizarla en un esquema propio y así poder clasificar, analizar, sintetizar y reorganizar la información. Y por último se estableció una reflexión la cual permite establecer un juicio crítico, un punto de vista, para determinar hasta qué punto la información encontrada es útil, veraz, cierta, buena, interesante, actual, importante, apegada a la realidad entre otros (Núñez, 2011).

V. DESARROLLO TEMÁTICO

5.1. Importancia de la nanopartículas (nanomateriales)

La nanotecnología es una aplicación tecnológica que se usa para la obtención de productos innovadores en diversas áreas de la ciencia y que ayudan a resolver problemas específicos. Estas aplicaciones se están usando en la agricultura, el procesamiento, envasado, seguridad, control de calidad y embalaje de alimentos, aumentando las propiedades de barrera, mejorando la resistencia mecánica y térmica, desarrollando superficies antimicrobianas activas y creando materiales de embalaje nanobiodegradables. La nanotecnología tiene una aplicación en la industria alimentaria mediante el diseño de un sistema de suministro de nutrientes para producir agroquímicos nanoformulados, enriquecer los valores nutricionales y generar productos a través de la encapsulación bioactivos. Se ha utilizado en el desarrollo innovador de biosensores para la detección de patógenos y contaminantes químicos (Galindo *et al.*, 2022; Thakur *et al.*, 2019; Berekaa, 2015).

Las nanopartículas tienen como objetivo mejorar la biodisponibilidad de nutracéuticos y suplementos para la salud de tamaño nanométrico, mejorar el sabor, la consistencia, la estabilidad y la textura de los productos alimenticios (Chaudhry *et al.*, 2008).

En la actualidad hay 1814 productos que contienen nanomateriales (Vance *et al.*, 2015), la categoría de Salud y Fitness es la que más productos contiene (42% del total), mientras que la de alimentos y bebidas representa solo el 6.5%.

A pesar de las ventajas con el uso de nanopartículas, no se han comercializado muchos productos para aplicaciones agrícolas; esto podría explicarse por varios factores, como un número insuficiente de ensayos de campo y la subutilización de los sistemas de hospedantes

de plagas en cultivos, es importante hacer estudios científicos para tener un enfoque racional y facilitar el desarrollo de nanoproductos comerciales en esta área del conocimiento (Lira *et al.*, 2018)



Figura. Empleo de la nanotecnología en la industria alimentaria (Lira *et al.*, 2018).

5.2. Concepto de nanopartículas

Las nanopartículas (NPs) son nanobjetos que se miden en nanoescala que son capaces de auto ensamblarse y tienen diferente reactividad, dureza, conductividad, solubilidad, velocidad de absorción y biodisponibilidad respecto de las partículas macro (Ojeda *et al.*, 2019).

Las NPs no son moléculas simples, se componen de tres capas: a) La capa superficial, que está formada de variedad de moléculas pequeñas, iones metálicos, surfactantes y polímeros, b) La capa de cubierta, que es un material químicamente diferente del núcleo en todos los aspectos, y c) El núcleo, que es esencialmente la porción central de la NPs (Shin *et al.*, 2016).

5.3. Clasificación de nanopartículas (nanomateriales)

Las nanopartículas se dividen en categorías en función de su morfología, tamaño y propiedades químicas; incluyen metales, óxidos metálicos, arcilla y carbono, así como nanomateriales orgánicos consistentes en nanoencapsulados y nanocompuestos; estos se describen a continuación

5.3.1. NPs basadas en carbono

Los fullerenos y los nanotubos de carbono (CNT) representan dos clases principales de nanopartículas basadas en carbono. Los fullerenos, se conforman con 60 átomos de carbonos y están dispuestos pentagonal y hexagonalmente (Vasilievna y Ortiz, 2002), están hechos de jaulas huecas globulares; se usan en conductividad eléctrica, presentan alta resistencia y estructura; son muy buenos conductores a temperatura ambiente, pudiendo transportar elevadas densidades de corriente, presentan excelentes propiedades, lo que resulta fácil y económico poderlos fabricarlos, es un material que es 10 veces más ligero que el acero, 100 veces más resistente, y a la vez 10 000 veces más fino que un cabello, además tiene propiedades eléctricas que pueden ser conductores como aislantes (Andrade *et al.*, 2012; Astefanei *et al.*, 2015).

Los CNT son alótropos del carbono, como el diamante o el grafito, tienen una estructura tubular alargada, de 1 a 2 nm de diámetro (Ibrahim, 2013). Estos pueden predecirse como metálicos o

semiconductores en función de su diámetro y direccionalidad (Aqel *et al.*, 2012). Estos se parecen estructuralmente a una lámina de grafito que rueda sobre sí misma. Las láminas laminadas pueden ser de pared simple, doble o múltiple y, por lo tanto, se denominan nanotubos de carbono de pared simple (SWNT), de pared doble (DWNT) o de pared múltiple (MWNT), respectivamente.

5.3.2. NPs de metal

Las nanopartículas metálicas están formadas exclusivamente por precursores metálicos. Debido a las características conocidas de resonancia plasmónica superficial localizada (LSPR), estas nanopartículas poseen propiedades optoelectricas únicas. Las nanopartículas de cobre (Cu), plata (Ag) y oro (Au), tienen una amplia banda de absorción en la zona visible del espectro solar electromagnético (Dreaden *et al.*, 2012).

5.3.3. NPs de cerámica

Las nanopartículas cerámicas son sólidos inorgánicos, sintetizados mediante calor y enfriamiento sucesivo. Se encuentran en formas amorfas, policristalinas, densas, porosas o huecas (Sigmund *et al.*, 2006). Por lo tanto, estas nanopartículas están recibiendo gran atención de los investigadores debido a su uso en aplicaciones como catálisis, fotocatalisis, fotodegradación de colorantes y aplicaciones de imágenes (Thomas *et al.*, 2015).

5.3.4. NPs de semiconductores

Las nanopartículas semiconductoras poseen bandas prohibidas amplias y, por lo tanto, muestran una alteración significativa en sus propiedades con el ajuste de la banda prohibida. Por lo tanto, son materiales muy importantes en fotocatalisis, fotooptica y dispositivos electrónicos. Como ejemplo, se ha comprobado que una variedad de nanopartículas

semiconductoras son excepcionalmente eficientes en aplicaciones de división de agua, debido a sus posiciones adecuadas y borde de banda (Hisatomi *et al.*, 2014).

5.3.5. NPs poliméricas

Son nanopartículas de base orgánica y son llamadas nanopartículas poliméricas (PNPs). En su mayoría tienen forma de nanoesferas o nanocápsulas (Mansha *et al.*, 2017). Las primeras son partículas matriciales cuya masa total es sólida y las demás moléculas están adsorbidas en el límite exterior de la superficie esférica. La masa sólida está encapsulada dentro de la partícula por completo (Rao y Geckeler, 2011).

5.3.6. NPs basadas en lípidos

Estas nanopartículas contienen fracciones lipídicas y se utilizan de manera eficaz en muchas aplicaciones biomédicas; son esféricas y tienen un diámetro que varía de 10 a 1000 nm. Al igual que las nanopartículas poliméricas, las nanopartículas lipídicas poseen un núcleo sólido hecho de lípidos y una matriz que contiene moléculas lipofílicas solubles. Los emulsionantes estabilizan el núcleo externo de estas nanopartículas (Rawat *et al.*, 2011).

5.3.7 nanomateriales orgánicos consistentes en nanoencapsulados y nanocompuestos

Estas nanopartículas se agrupan en: a) Los nanomateriales (NMs) orgánicos o blandos. Se utilizan para encapsular vitaminas, antioxidantes, colorantes, saborizantes, preservadores, nutracéuticos, agentes antimicrobianos, plaguicidas y medicamentos veterinarios, mejorando así su estabilidad y su biodisponibilidad. Forman micelas, liposomas o nanoesferas, en muchas ocasiones de origen natural, que pueden ser de carácter lipídico, proteico o polisacarídico; b) los NMs combinados orgánico/inorgánico: son agregados a una matriz que actúan como antimicrobianos, antioxidantes, reguladores de permeabilidad, se utilizan en el envasado de

alimentos, se incorporan a la matriz de polímero de los envases para ofrecer resistencia mecánica o una barrera contra los olores, los sabores o la humedad, un ejemplo son las nanoarcillas, usadas para el desarrollo de envases alimentarios, también se pueden utilizar para preparar nanocompuestos con polímeros polares con el fin de obtener un buen nivel de dispersión, mejores propiedades mecánicas y otras y c) los NMs inorgánicos o duros: son metales y óxido de metales, pertenecen las NPs de plata (Ag), hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (mg), selenio (Se), dióxido de titanio (TiO₂), óxido de zinc (ZNO) y silicatos utilizados como aditivos, suplementos alimentarios o en el envasado de alimentos como recubrimiento de superficies, barreras contra gases y contra microorganismos, protección ultravioleta (Singla *et al.*, 2012; De Ariño, 2018). La producción de nanomateriales de origen polimérico involucra las nanoemulsiones, que facilita el uso de menos grasa, ofreciendo al consumidor una opción más saludable un papel importante en la producción de cremas para untar y mayonesa (Cushen *et al.*, 2012; Caro *et al.*, 2019).

Compuestos nanoestructurados a base de óxido de Fe con Mg o Ca añadidos mediante tecnología de aerosol de llama escalable. La combinación de alta solubilidad en Fe y baja reactividad en los alimentos hace que estos compuestos nanoestructurados sean prometedores para la fortificación de alimentos, son altamente solubles en ácido diluido y es probable que se absorban bien en el intestino, pero causan cambios de color menos severos que el FeSO₄ cuando se agregan a alimentos difíciles de fortificar. Por tanto, El óxido de hierro (E172), usado como colorante alimenticio. Las nanoestructuras de hierro son útiles para enriquecer ciertos alimentos y compuestos con este metal, ya que la deficiencia de este micronutriente en la salud humana es una de las más comunes (Hilty *et al.*, 2011).

5.4. Uso de las nanopartículas en la agricultura

Peters *et al.* (2014) menciona que existen dos grupos importantes en el sector agrícola, que son las nanocápsulas que comprenden los nanofertilizantes (NFs) y nanoplaguicidas (NPIs), los cuales, han demostrado tener beneficios significativamente comparados con los fertilizantes convencionales. El uso de los nanofertilizantes (NFs) va dirigida al aumento de la producción empleando materiales a escala nanométrica para facilitar su aprovechamiento en un nivel óptimo, reduciendo costos de producción y contribuyendo a la sostenibilidad agrícola ya que aumenta la eficiencia en el uso de nutrientes y la tolerancia al estrés abiótico y su uso en combinación con microorganismos, para lograr mayores rendimientos ante el cambio climático, también ayuda a minimizar la lixiviación de nutrientes en las aguas subterráneas. (Sharma y Singhvi, 2017). Se ha reportado que entre el 50-70% del nitrógeno aplicado por fertilizantes convencionales se pierde en el ambiente, quedando limitada su disponibilidad para los cultivos (Han *et al.*, 2015). Existe evidencia que demuestra que los NFs pueden incrementar hasta el 30% de aprovechamiento comparado con fertilizantes convencionales (Kah *et al.*, 2018); por ejemplo, la aplicación de NFs fosfatados se asoció con el incremento del 30% en cultivos de soya (*Glycine max L.*) y aumento en la producción de semilla del 20% comparado contra los rendimientos obtenidos empleando fertilizantes convencionales (Liu y Lal, 2015); en dosis bajas promueve la generación de mayor biomasa en rábano (*Raphanus sativus L.*) (Hernández *et al.*, 2022), en maíz (*Zea mays L.*) aumenta el contenido de clorofila, rendimiento y mayor resistencia al estrés abiótico (Yoon *et al.*, 2020).

Diversos materiales nanoestructurados tales como nanoarcillas, hidroxiapatita, quitosano, ácido poliacrílico y zeolitas se han usado para desarrollar fertilizantes empleados en suelo o de aplicación foliar (Guo *et al.*, 2018; Maghsoodi *et al.*, 2020). Tal es el caso de la hidroxiapatita, la

cual, facilita las interacciones con compuestos químicos, como la urea, y favoreciendo la liberación lenta y controlada de nitrógeno. Kottegoda *et al.* (2011) reportaron que la urea modificada con NPs de hidroxiapatita pueden liberar el N para consumo de plantas durante más de 60 días comparadas con otros fertilizantes químicos, tales como urea o nitrato de amonio, los cuales liberaron el N hasta 30 días.

Las Zeolitas se pueden definir como minerales de aluminio, silicio y oxígeno que presentan una estructura ordenada de micro o nano-poros, que permiten (o no) el paso de algunas moléculas, son de origen volcánico, pueden usarse como catalizadores en la industria petroquímica o como tamices moleculares en la purificación de gases y líquidos, son materiales altamente porosos, esta propiedad permite que se usa para purificar el agua como ya hacían en el Imperio Romano (FECYT, 2003). Las zeolitas tienen potencial para ser utilizadas como agentes de protección de cultivos, su estructura de nido de abeja, junto con su capacidad de absorción de dióxido de carbono y su capacidad de reducción del estrés térmico, los hace adecuados como producto de recubrimiento de hojas. Además, su capacidad de absorción de agua y sus tamaños de partícula más pequeños los hacen eficaces contra enfermedades fúngicas y plagas. Por último, estas propiedades garantizan que las zeolitas puedan actuar como portadoras de diferentes sustancias activas, lo que permite utilizar zeolitas para aplicaciones de liberación lenta, (De Smedt *et al.*, 2015).

Las sales de fosfato solubles sintéticas, mejor conocidas como nanopartículas de hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, también conocida como nHAp, tienen como base la roca fosfórica, cuentan con la capacidad de liberar nutrientes de manera lenta y controlada, lo que puede incrementar el rendimiento y calidad de cultivos, además de mejorar la sostenibilidad general de los sistemas agrícolas (Hernández *et al.*, 2022). En trigo (*Triticum aestivum*) las nHAp se han usado ya que

tienen mayor movilidad y una estadía prolongada en el suelo, facilitando así su absorción por las raíces de la planta (Maghsoodi *et al.*, 2020), la aplicación foliar de nHAp en pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) no incremento el rendimiento, pero si estimulo la biosíntesis de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos, mejorando la calidad del fruto (Rocha-Santillano *et al.*, 2024)

Kundu y Chabra (2023), evaluaron efecto de la aplicación de nanourea en el crecimiento y el rendimiento del maíz (variedad C-1415) en dos etapas de crecimiento, demostraron que la aplicación de 75 % RDN + pulverización foliar de nanourea al 0.1 % los atributos de crecimiento y rendimiento en maíz fueron significativa; la aplicación de 75 % de RDN + 2 pulverizaciones foliares de nanourea en la etapa de la altura de la mazorca y de la formación de espigas fue significativamente similar a la dosis completa de RDN, esta podría ser una alternativa de manejo adecuada para la práctica de cultivo sustentable del maíz.

Mahajan *et al.* (2011) reportaron un incremento del 10% en el contenido de clorofila en Chícharo de vaca (*Vigna unguiculata* L.Walp) al aplicar foliar NPs de Fe en dosis de 0.5 g L⁻¹ comparado contra el contenido en plantas expuestas a soluciones comunes de Fe.

El calcio y magnesio son elementos esenciales en la nutrición vegetal y actualmente en el mercado existen fertilizantes constituidos por nanopartículas de dolomita, que permiten incorporarlos al suelo o vía foliar. Yfran *et al.* (2024) evaluaron la incidencia de la nanofertilización de calcio/magnesio sobre la productividad, nutrición foliar y calidad de fruta del limón Eureka. El aporte de nanofertilizante de calcio y magnesio aplicado vía foliar con dosis de 2 L ha⁻¹ y aplicado al suelo con dosis de 4 L ha⁻¹ presentaron mayor asociación con la concentración de magnesio foliar, favoreciendo una acumulación de este nutriente en el tiempo,

con valores óptimos en el primer año, también se correlaciono los nanofertilizante de Ca y Mg en dosis de 4 L ha⁻¹ aplicado al suelo y el porcentaje de jugo de la fruta.

Fortis *et al.* (2022) evaluaron los efectos de la aplicación foliar de NPs-ZnO en diferentes concentraciones y determino su efecto sobre el rendimiento, la calidad comercial y nutracéutica en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) en un sistema hidropónico. El tratamiento de 10 mg. L⁻¹ presentó la mayor altura (25,33 cm) y el control (22,66 cm), mientras que las lechugas tratadas tuvieron de 2,8 a 6,5 hojas más, presentaron 4 y 8 % más de perímetro de corona y su peso fue mayor tanto frescas como secas que el tratamiento testigo. Se observa un aumento relativo en la concentración de fenoles totales en las hojas de lechuga tratadas con NPsZnO a medida que aumenta la concentración de NPsZnO aplicada. El efecto de NPsZnO sobre la actividad de POD aumentó primero en 10, 15 y 20 mg. L⁻¹ y luego el efecto disminuyó con un aumento en NPsZnO (25mg. L⁻¹). La biofortificación de Zn a través de NPsZnO por vía foliar presentó un ligero aumento de Zn en hojas de lechuga, especialmente en los tratamientos con mayor concentración de NPsZnO, lo que llevó a un aumento en los niveles de compuestos antioxidantes (fenoles y flavonoides), actividad enzimática POD y consecuentemente una mayor calidad nutracéutica. Por lo tanto, la exposición de la lechuga a las concentraciones de NPsZnO aplicadas no de muestran ni estímulos fisiológicos ni fitotoxicidad que afectaran el contenido de clorofila o carotenoides de las plantas tratadas.

Galindo *et al.* (2022) evaluaron la síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) en plántulas de lechuga (*Lactuca sativa L.*) Se obtuvieron tamaños de partícula de 67.31-71.1 nm. El estudio analizó soluciones de NPs-ZnO en un rango de concentraciones de 25 a 125 mg L⁻¹, logrando valores mayores del porcentaje de germinación (36.97%), peso fresco de plúmula (23.91%), peso fresco de radícula (63.25%) y longitud de radícula (50.58%) respecto a los

testigos, en la dosis de 50 mg L⁻¹ NPs-ZnO y se incrementó el contenido de fenoles totales (207.9%). Dosis superiores a 125 mg L⁻¹ NPs-ZnO disminuyen el contenido de clorofila, causando efectos fitotóxicos en las plántulas de lechuga; en cuanto al contenido de carotenoides el mejor tratamiento fue de 100 mg L⁻¹ NPs-ZnO.

Guillen *et al.* (2022) evaluaron el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de Fe (NPs Fe₂O₃) sobre el rendimiento y la biosíntesis de compuestos bioactivos en frutos de pepino (*Cucumis sativus* L.). El tamaño de las nanopartículas tiene un promedio menor a 50 nm, un nivel de pureza de 99.7% y una densidad de 5.81 g cm⁻³. La aspersion foliar con NPs Fe₂O₃ mejoró el rendimiento y la biosíntesis de compuestos bioactivos en frutos de pepino, al aumentar 38.99% el rendimiento, 30.18% la biosíntesis de compuestos y un incremento de 23.26% de Fe en frutos y una mayor longitud con la aplicación foliar de 75 mg L⁻¹. Los mejores tratamientos fueron de 50 y 75 mg L⁻¹ de NPs Fe₂O₃, mientras que con 100 mg L⁻¹ se logró la mayor concentración de Fe en hojas y frutos, pero disminuye el tamaño de los frutos, esto podría ser debido a la biodisponibilidad y alta solubilidad de las NPs de Fe₂O₃, la cual mientras la dosis de NPs sea mayor, la absorción y facilidad de transporte de los nutrientes en la planta podría ser menor.

Las nanopartículas de plata (NPsAg) son quizás las NP`s metálicas más reconocidas por sus propiedades antimicrobianas y antifúngicas, principalmente usadas para el manejo de enfermedades de plantas causadas por esporas de hongos patógenos (Nair *et al.*, 2010).

Jo *et al.* (2009) Se ha observado que los iones de plata inhiben los niveles de crecimiento de hongos como *Bipolaris sorokiniana* y *Magnaporthe grisea* en las plantas. Los estudios demuestran que con concentraciones de 500 ppm de NPsAg resulta en una disminución del 91

% de estos hongos seis horas después de su aplicación, disminuyendo su efectividad con el tiempo.

Los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT), se han visto implicados sobre su posible uso en la agricultura. (Gohari *et al.*, 2020) evaluaron el uso potencial de MWCNTs en plantas bajo condiciones óptimas y de estrés abiótico. Aplicaron ácido carboxílico (MWCNT-COOH) para aumentar la dispersión en agua en albahaca dulce (*Ocimum basilicum L.*) cultivada en condiciones de hidroponía; la aplicación de MWCNT-COOH en dosis bajas (25 y 50 mg L⁻¹) aliviaron los daños inducidos por el estrés salino al aumentar las actividades enzimáticas antioxidantes, los compuestos fenólicos, los parámetros fisiológicos y el contenido y composición de los aceites esenciales. Por el contrario, la alta concentración de MWCNT-COOH provocó agregaciones dentro del tejido vegetal que provocaron síntomas de toxicidad.

Una propuesta reportada para monitorear la producción de etileno en frutas como plátanos, manzanas, tomates, fresas y naranjas, es el uso de películas de nanocopos de disulfuro de molibdeno con nanotubos de carbono de pared simple (MoS₂-SCNT). Esta preparación fue depositada sobre electrodos de plata impresos sobre tereftalato de polietileno flexible (PET). Finalmente, una capa semiconductor de complejos de cobre (mercaptoimidazol). El monitoreo se efectuó mediante un dispositivo bluetooth, proporcionando independencia a la incubación de las frutas evaluadas. El sensor inalámbrico diseñado 2-MoS₂-SCNT registró las respuestas conductimétricas en función del tiempo a temperatura ambiente. La detección selectiva de etileno con una sensibilidad es 100 ppb tanto en frutos climatéricos como no climatéricos, resultando en una alternativa práctica para monitorear frutas en condiciones de almacenaje, que podrían ser escalables comercialmente (Chen *et al.*, 2020).

Mahmoodzadeh *et al.* (2013) examinaron los efectos de las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂) en semillas de canola (*Brassica napus* L.), sobre la germinación de las semillas y el vigor de las plántulas. El tratamiento de TiO₂ a nanoescala (tamaño de partícula medio de 20 nm) a una concentración de 2000 mg L⁻¹ promovió tanto la germinación de las semillas como el vigor de las plántulas, en las que la tasa de germinación más alta y más baja se obtuvo en 2000 y 1500 mg L⁻¹ respectivamente. Las concentraciones más altas de TiO₂-NPs mostraron plúmulas y radicales agrandados (1200 y 1500 mg L⁻¹) en comparación con el testigo.

Se ha reportado la eficacia antimicrobiana de nanopartículas de níquel sintetizadas biológicamente contra bacterias gram-negativas fitopatógenas (*Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, y *Salmonella typhi*) y Gram-positivas (*B. subtilis*, *Staphylococcus epidermidis*) bacterias y hongos (*Candida albicans*, *Candida tropicalis*, *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus clavatus*, y *Aspergillus niger*) (Sharma *et al.*, 2017).

Las nanopartículas de ferrita de cobalto y níquel desarrolladas (CoFe₂O₄ y NiFe₂O₄) se prueban con éxito para determinar su actividad antimicótica contra tres hongos fitopatógenos: *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum gloeosporioides* y *Dematophora necatrix*. Además, también se observa que estas nanopartículas de ferrita reducen la incidencia del marchitamiento por *Fusarium* en el pimiento. autor

Vaca *et al.* (2023) desarrollaron un nanomaterial a base de una estructura de hidróxido doble laminar HDL (ZnAl) impregnado de moléculas orgánicas de timol; se estudió el efecto fúngico vitro e in vivo ante dos hongos fitopatógenos *Colletotrichum gloeosporioides* y *Botrytis cinerea* causantes de enfermedades en plantas como la antracnosis y el moho gris respectivamente.

La importante contribución de las nanopartículas de silicio (Si-NP) en la mitigación de los efectos adversos de la salinidad en árboles frutales al mejorar el mecanismo fisiológico y el metabolismo celular. Muhammad *et al.* (2022) alientan el uso de nanopartículas de silicio en árboles frutales para lograr un mayor rendimiento con una excelente calidad de la fruta al mejorar el mecanismo de defensa contra las condiciones de salinidad inducida, así mismo para mitigar los efectos adversos del estrés biótico y abiótico y reducir las pérdidas poscosecha, así como la reducción de la lesión oxidativa. Las nanopartículas de silicio variaron de 10 a 100 nm. Sin embargo, las nanopartículas de silicio se vuelven tóxicas cuando su tamaño oscila entre 50 nm y 200 nm. Las nanopartículas de silicio tienen el potencial de superar el estrés salino mediante la restricción de la absorción de Na^+/Cl^- a través de las raíces y mejorando la absorción de nutrientes esenciales. Por lo tanto, la aplicación de Si-NPs es una forma eficaz de mejorar el peso y el tamaño de la raíz al mitigar los efectos adversos de la salinidad. Este tipo de fertilizantes son importantes para aumentar el rendimiento de la fruta con una calidad excelente.

También se han estudiado nanopartículas de silicio, selenio y óxido de cobre en recubrimientos antimicrobianos provocando daños oxidativos en las membranas bacterianas y con potenciales aplicaciones para implantes biomédicos (Nastulyavichus *et al.*, 2018).

Asgari *et al.* (2018) compararon los efectos del silicato de sodio y las nanopartículas de silicio (SiNPs) (ambos a dos concentraciones de 5 y 10 mM) por separado sobre la lignificación de la pared celular del xilema, las actividades enzimáticas antioxidantes, la ultraestructura de las células de hojas y raíces, la expresión del transportador de silicio (Lsi1) y la fenilalanina amoníaco liasa (PAL), evaluaron el contenido de proteínas y el contenido químico de plantas de avena (*Avena sativa* L.) cultivadas hidropónicamente. Los resultados indicaron que los SiNPs no tuvieron un efecto tóxico en las plantas de avena y, en muchos casos, mejoraron el

crecimiento de las plantas. El gen transportador de silicio (Lsi1) se expresó en las plantas expuestas a SiNPs, sin embargo, a niveles más bajos (-37% en raíces) que las expuestas a tratamientos con silicatos; encontraron que las SiNPs y el silicato tuvieron los mismos efectos, aunque con diferentes intensidades, en las plantas de avena. Ambas formas de absorción de silicio son posibles mediante un transportador de silicio(Lsi1), pero una gran cantidad de absorción de SiNPs también ocurre a través de la vía apoplástica. Las SiNPs tuvieron un mejor efecto sobre los parámetros de crecimiento y la estructura celular. En general, las SiNPs tuvieron los mismos efectos que el silicato en las plantas de avena, y en muchos casos incluso más fuertes. Pero a pesar de la falta de toxicidad de esta sustancia en la avena, las consecuencias ambientales (a través de la descomposición de las plantas y sus efectos sobre los herbívoros (a través del consumo de plantas) no están claras.

Pérez *et al.* (2019) cuantificaron la respuesta agronómica y bioquímica de las plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum L.*) desarrolladas bajo estrés salino con la aplicación foliar de nanopartículas de cobre. Las plantas de tomate sometidas a estrés salino presentan un crecimiento y desarrollo reducidos como resultado de alteraciones en la relación Na^+/K^+ . La aplicación foliar de nanopartículas de cobre reduce estas alteraciones al mejorar la relación Na^+/K^+ . La aplicación foliar de nanopartículas de cobre favorece una mejor calidad del fruto. En condiciones de salinidad, la aplicación de nanopartículas en plantas de tomate aumenta la acumulación de compuestos antioxidantes, como vitamina C, licopeno, GSH, fenoles totales y flavonoides (tanto en hojas como en frutos). De manera similar, la actividad enzimática de la fenilalanina amonio liasa (PAL), la ascorbato peroxidasa (APX), la glutatión peroxidasa (GPX), la superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT) aumentó en el tejido foliar un 104 %, 140 %, 26 %, 8 % y 93 %, respectivamente. Los hallazgos de estos experimentos sugieren que la

pulverización foliar de nanopartículas de cobre, que estimula los mecanismos antioxidantes de la planta, es una estrategia factible para controlar y/o mitigar el daño causado por el estrés salino en los tomates.

An *et al.* (2020) Usaron el cebado de semillas en algodón (*Gossypium hirsutum L.*) y adicionando nanopartículas de óxido de cerio (PNC) recubiertas con ácido acrílico evaluaron las características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas en las plántulas de algodón bajo estrés salino. Las semillas cebadas con 500 mg L⁻¹ de PNC en agua (24 h) y germinadas bajo estrés salino (200 mM NaCl) retuvieron nanopartículas en el tegumento interno de la cubierta de la semilla, el cotiledón y el meristemo apical de la raíz. El cebado de semillas con PNC aumentó significativamente la longitud de la raíz de la plántula (56%), el peso fresco (41%) y el peso seco (38%), modificó la estructura anatómica y vigor de la raíz (114%) bajo estrés salino en comparación con el testigo (agua). El cebado de semillas con PNC condujo a una disminución en la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en las raíces de las plántulas y mejoro los cambios morfológicos y fisiológicos de las raíces inducidos por el estrés por salinidad. Las raíces de las semillas expuestas exhibieron un contenido similar de Na, una disminución significativa de K, un mayor contenido de Ca y Mg en comparación con el testigo.

Cuadro 1. Diferentes tipos de nanopartículas utilizadas como nanofertilizantes, respuesta

Nanofertilizantes	Cultivos	Efectos	Referencias
Nanotubos de carbono de pared múltiple	<i>Hordeum vulgare</i> L. <i>Glycine max</i> <i>Zea mays</i> L. <i>Triticum aestivum</i> L. <i>Arachis hypogaea</i> , <i>Allium sativum</i>	Los nanotubos inducen un aumento en la germinación, crecimiento de las plántulas, mayor absorción de agua y acumulación de biomasa.	Lahiani <i>et al.</i> , 2013
Nanopartículas de	<i>Glycine max</i>	Las HA-NPs fueron efectivas en el suministro de P,	Liu and Lal, 2014

nanohidroxiapatita (HANPs) con superfosfato triple (TSP)		aumentando la tasa de crecimiento y el rendimiento de las semillas en un 32,6 y 20,4%	
Nanopartículas de ferrihidrita dopadas con P (P-nFh)	<i>Oriza sativa</i> L.	Las tasas de absorción de P-nFh fueron similares a las del P administrado como fosfato. Los resultados muestran un efecto positivo en el crecimiento de las plantas.	Bollyn <i>et al.</i> , 2019
ZnO NPs	<i>Coffea arabica</i>	Aumento de la tasa de fotosíntesis y biomasa.	Rossi <i>et al.</i> , 2019
	<i>Triticum aestivum</i> L.	Mayor rendimiento de grano y acumulación de biomasa.	Du <i>et al.</i> , 2019
	<i>Nicotiana tabacum</i> L.	Mejora el crecimiento de las y actividad enzimática de las plantas.	Raliya and Tarafdar, 2013
	<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	Efecto positivo sobre la fisiología del crecimiento, mejora la acumulación de biomasa y la concentración de nutrientes.	
FeS ₂ NPs	<i>Cicer arietinum</i> ; <i>Pinacia oleracea</i> ; <i>Daucus carota</i> ; <i>Brassica juncea</i> y <i>Sesamum indicum</i>	Aumento de la germinación y el rendimiento.	Das <i>et al.</i> , 2016
CuO NPs	<i>Spinacia oleracea</i>	Mejora de la fotosíntesis	Wang <i>et al.</i> , 2020
	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Induce resistencia a enfermedades.	Giannousi <i>et al.</i> , 2013
Fe/SiO ₂ NPs	<i>Arachis hypogaea</i> <i>Zea mays</i> L.	Aumenta el crecimiento y la acumulación de biomasa	Najafi <i>et al.</i> , 2017
Al ₂ O ₃ NPs	<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Inducir resistencia a <i>Fusarium</i> spp.	Shenashen <i>et al.</i> , 2017
TiO ₂ NPs	<i>Spinacia oleracea</i>	Inducen una mayor acumulación de biomasa, clorofila, nitrógeno y contenido de proteína	Yang <i>et al.</i> , 2007
	<i>Triticum aestivum</i> L.	Inductores de crecimiento y tolerancia al estrés calórico.	Iqbal <i>et al.</i> , 2019
Ag NPs	<i>Vigna sinensis</i>	Mejora la nodulación radicular y la diversidad microbiana del suelo	Pallavi <i>et al.</i> , 2016
	<i>Vigna unguiculata</i>	Resistencia a la bacteria <i>X. axonopodis</i>	Vanti <i>et al.</i> , 2019

		pv. Malvacearum	
TiO ₂ y SiO ₂	<i>Oryza sativa</i> L.	Mejora del crecimiento	Rizwan <i>et al.</i> , 2019

Fuente: Anzaldo *et al.* (2024).

Los nanoplaguicidas (NPIs)

El uso de los plaguicidas alrededor del mundo, un porcentaje mínimo del plaguicida aplicado alcanza su objetivo, mientras que la cantidad restante permanece en el ambiente generando un daño considerable (Christiaens *et al.*, 2020).

Por tal motivo, en los últimos años han surgido nuevas alternativas que pudieran contrarrestar las deficiencias en los plaguicidas convencionales, por ejemplo, los nanoplaguicidas (NPIs).

Según Kah *et al.* (2013) son sustancias que contienen deliberadamente partículas con un rango de tamaño de 1 a 1,000 nm en alguna de sus dimensiones y que muestran propiedades novedosas en el control, prevención o destrucción de plagas. Algunos estudios han mostrado resultados exitosos de la aplicación de NPIs, demostrando su alta efectividad contra un amplio rango de plagas. Por ejemplo, estudios *in vitro* con imidacloprid demostraron ser efectivos con el 100% de mortalidad contra *Martianus dermestoides* después de 142 h; asimismo, la aplicación del 50% de nano-SDS/Ag/TiO₂- imidacloprid resultó ser significativamente más efectiva (concentración letal CL50:9.86 mg L⁻¹) comparado con el 95% del imidacloprid (CL50: 13.45 mg L⁻¹; Guan *et al.*, 2008). Paralelamente, se ha demostrado que la nanoformulación de este plaguicida es susceptible a la fotodegradación, otorgándole una ventaja sustancial en términos ambientales respecto a otras formulaciones convencionales. En otro estudio reportado por Kumar *et al.* (2013), evidenciaron un incremento en la toma de permetrina presente en nanoformulaciones comparada con la versión comercial contra *Aedes aegypti*; de manera paralela se demostró que el impacto negativo contra bacterias de suelo y plantas fueron

reducidas, es decir, la nanoformulación mostró mayor selectividad contra el agente objetivo. Resultados similares se observaron cuando se emplearon nanoformulaciones de polietileno glicol de carbofurano y acefato; la baja toxicidad del nanoacefato hacia los organismos fuera de su espectro de acción fue comprobada y esta fue significativamente menor que aquella mostrada por formulaciones comerciales. Por tanto, se ha demostrado que el incremento en la eficiencia de las nanoformulaciones se debe principalmente a la liberación lenta y controlada de los ingredientes activos y no al incremento en la absorción de los ingredientes activos de estas nanoformulaciones (Jampílek y Kráľová, 2017).

El uso de nano-encapsulados para liberación de pesticidas y otras sustancias químicas con la ventaja de controlar mejor su liberación en el medio ambiente y su movimiento. Es decir, los recubrimientos pueden permitir que las partículas no se adhieran a las plantas debido a su afinidad y así no se produzca la acumulación de esta sustancia tóxica en la planta y la liberación del compuesto se produce más lentamente y por tanto no hay problemas de sobredosis temporal, minimizando la contaminación (Kah *et al.*, 2012).

El uso excesivo de plaguicidas para las actividades agrícolas causa efectos adversos en la salud humana y puede provocar contaminación ecológica. Por lo tanto, ha habido una creciente demanda de métodos analíticos precisos, sensibles, simples y selectivos para la determinación de residuos de plaguicidas en productos alimenticios, suelos, entre otros. Tümay *et al.* (2021) Desarrollaron un método electroquímico para la determinación simultánea de plaguicidas de paratió y clorantraniliprol basado en un nuevo nanomaterial híbrido electroactivo y electropolimerizable portador de grupos. El nuevo híbrido ferroceno-tiofeno modificado por nanotubo de carbono (FT@CNT) se preparó mediante la modificación de la superficie del nanotubo de carbono con restos de tiofeno-ferroceno mediante química de clic y se utilizó como

nanosensor electroquímico. Las condiciones experimentales, como el pH y la concentración del nanosensor, se optimizaron antes de la determinación electroquímica de plaguicidas de paratión y clorantraniliprol en tomates, manzanas y muestras de suelo. La comparación entre el método electroquímico y otras técnicas analíticas para la determinación de plaguicidas reveló que los métodos electroquímicos no sólo eran fáciles de operar y rápidos, sino también altamente sensibles y selectivos para la determinación simultánea de residuos de paratión y clorantraniliprol en muestras de alimentos y suelo. El material híbrido demostró una excelente estabilidad y una alta sensibilidad hacia los plaguicidas paratión y clorantraniliprol.

Grillo *et al.* (2012) prepararon y caracterizaron nano cápsulas de poli (caprolactona) para encapsular diferentes herbicidas como: ametrina, atrazina y simazina, con una eficiente capacidad de incorporación superior al 84 % de compuesto activo. Los experimentos *in vitro* de la liberación sugieren que el mecanismo de dosificación del compuesto es gobernado por la relajación de las cadenas poliméricas, mientras que los análisis de toxicidad sobre células humanas (linfocitos y células de las cepas *Allium*), muestran que las formulaciones de nanocápsulas conteniendo el herbicida son menos tóxicas que las formulaciones de herbicida libre.

Caixeta *et al.* (2015) estudiaron en plantas de mostaza (*Brassica juncea*), adicionando herbicida a menores concentraciones en comparación a la formulación no encapsulada; la incorporación del pesticida dentro de la matriz polimérica, hay una reducción de su movilidad en el suelo, reduciendo la probabilidad de contaminación de fuentes de agua y reduciendo la citotoxicidad y genotoxicidad. En estudios realizados en maíz, indican que el conjugado de PCL-antrazina no produce efectos secundarios persistentes sobre la especie evaluada.

Los copolímeros son materiales poliméricos de naturaleza sintética obtenidos por la reacción de dos o más monómeros. Copolímeros de poli(vinilpiridina) y poli(vinilpiridina-co-estireno), dado a sus características anfífilas pueden autoensamblarse para formar NPs en dispersión acuosa. La capacidad de formar estructuras esféricas de tamaños entre 100 y 250 nm y con un núcleo hidrofóbico, ha sido aprovechada para encapsular fungicidas como tebuconazol y clorotalonil para el tratamiento sobre madera de pino. El estudio reveló que existe una relación inversamente proporcional entre la rapidez del proceso de liberación de ambos biocidas y el contenido de estireno en el copolímero. Lo anterior se explicó en términos de un incremento en la hidrofobicidad de la matriz polimérica que induce a una mayor interacción con la molécula orgánica biocida. Aunque la introducción de los pesticidas en la matriz polimérica mejoró la solubilidad del compuesto activo, la interacción polímero-biocida induce a un mayor tamaño de partícula y como consecuencia a una menor estabilidad de la suspensión en el tiempo (Liu *et al.*, 2001).

Cuadro 2. Nanopartículas utilizadas en el desarrollo de nanosensores para el sector agrícola

Nanopartículas (NPs)	Agroquímico o compuesto de interés detectado	Referencias
ZnO-quitosano	<i>Trichoderma harzianum</i>	Siddiquee <i>et al.</i> , 2014
Dióxido de titanio (TiO ₂)	Atrazina (herbicida)	Yu <i>et al.</i> , 2010
Óxido de grafeno	Nitratos	Pan <i>et al.</i> , 2016
Grafeno	Detección de herbicidas	Zhao <i>et al.</i> , 2011
Nanotubos de carbono de paredes múltiples	Glifosato y glufosinato (herbicidas)	Prasad <i>et al.</i> , 2014
Nanofibras PEDOT	Nitratos	Ali <i>et al.</i> , 2017
	Acetamiprid (insecticida)	Shi <i>et al.</i> , 2013
	Actividad de la urea y la ureasa	Deng <i>et al.</i> , 2016
AuNps	<i>Pantoea stewartii</i> sbsp. (bacteria)	Zhao <i>et al.</i> , 2014a; y. Zhao <i>et al.</i> , 2014b
	Organofosforados (plaguicidas)	Kang <i>et al.</i> , 2010

	Virus del mosaico <i>Cymbidium</i> (CymMV) y Virus de la mancha anular <i>Odontoglossum</i> (ORSV)	Lin <i>et al.</i> , 2014
AgNps	Detección de herbicidas	Dubas y Pimpan, 2008
Puntos cuánticos	Detección de ADN	Bakhori <i>et al.</i> , 2013

Fuente: Anzaldo *et al.*, 2024.

5.5 Aplicación de nanopartículas en Agricultura de precisión

La aplicación de nanopartículas en la agricultura de precisión es importante, ya que monitorea en tiempo real las condiciones ambientales y del suelo, así como del desarrollo de los cultivos (incluyendo el estrés); controla los insumos empleados, identifica patógenos, plagas u otros relacionados con el almacenamiento de granos u otros productos agrícolas, los pesticidas, antibióticos y fertilizantes que se aplican a las plantas y al suelo mediante riego por aspersión o goteo. Estos productos se aplican como preventivos o una vez que el patógeno ha afectado a la planta y sus síntomas son visibles se aplica un curativo; por el contrario, los dispositivos a nanoescala tienen la capacidad de detectar y tratar tempranamente la infección, la deficiencia nutricional u otro problema de la planta antes de que los síntomas sean evidentes. Este tipo de tratamiento se dirige solamente al área afectada (Delgado, 2009; Castro, 2017).

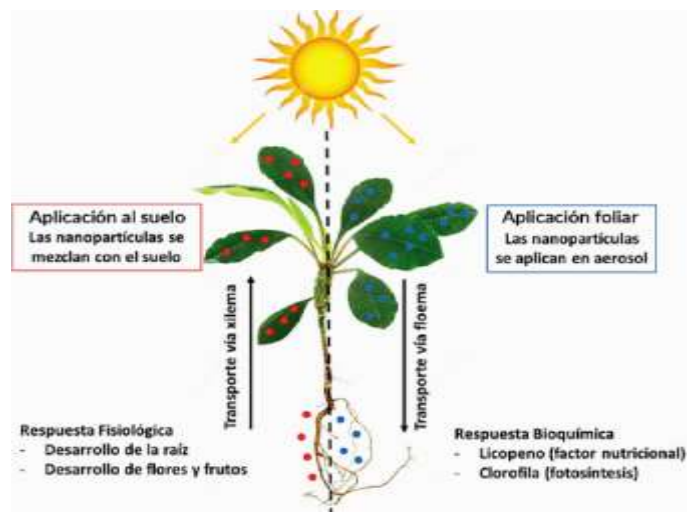


Figura. Vías de Absorción y traslocación de las nanopartículas en plantas (Lira *et al.*, 2018).

5.6. Síntesis de nanopartículas

Se denomina síntesis de NPs a la capacidad de construir estructuras pequeñas con rendimientos, propiedades ópticas, electrónicas, magnéticas y catalíticas únicas. Mediante la operación de las condiciones de síntesis es posible controlar del tamaño, forma, cristalinidad y funcionalización de la superficie de la NPs, e incluso la estabilidad de la misma, evitando cambios en la composición de la materia y permitiendo ampliar su aplicación en catálisis, electrónica, fotónica, magnetismo y sensores químicos y biológicos. Actualmente, los métodos de síntesis de NPs se dividen para su comprensión en top down (de arriba hacia abajo) que radica en la división de los sólidos en proporciones más pequeñas (de 1 a 100 nm) y en bottom up (de abajo hacia arriba) que consiste en la fabricación de nanopartículas a través de la condensación de átomos o entidades moleculares en una fase gaseosa o en solución. Sin embargo, en la mayoría de los casos se utilizan métodos químicos para la síntesis de NPs en

donde se emplean reactivos que resultan tóxicos para el ambiente, por lo cual, existe una búsqueda constante para la sustitución de estos por métodos biológicos a partir de plantas y microorganismos que resultan más amigables para el ambiente, rentables y no tóxicos (Zanella, 2012; Abdul *et al.*, 2022).

5.7. Biosíntesis de nanopartículas de extractos de plantas

La síntesis verde es una subdisciplina de la química verde, la cual tiene como objetivo eliminar las prácticas y los procesos que presentan un alto impacto ambiental, debido a la producción de desechos, subproductos o contaminantes, y para evitar el uso indiscriminado de materias primas renovables y no renovables (Torres *et al.*, 2021). Como método, la biosíntesis verde de nanopartículas permite involucrar extractos de origen vegetal (frutos, raíces, hojas, semillas, o tallos), moléculas (alcaloides, flavonoides, ácidos orgánicos, proteínas, terpenoides, y vitaminas), animales, microorganismos (bacterias, hongos y levaduras), enzimas (colesterol oxidasa, colesterol esterasa, glicerol quinasa, lipasa, etcétera), polímeros (polímeros no iónicos, aniónicos, catiónicos y anfóteros) y DNA (Yang *et al.*, 2022; Zanella, 2012). Se pueden emplear varios métodos para la síntesis de NPs, pero estos métodos se dividen en dos clases principales: (1) Enfoque de abajo hacia arriba y (2) Enfoque de arriba hacia abajo.

Un ejemplo es el uso de la hoja de *Cinnamomum camphora* (*C. camphora*) secada al sol parece ser un candidato ecológico y de bajo costo como reductor para sintetizar nanopartículas de plata u oro (Huang *et al.*, 2007).

Mohammed (2015) uso la técnica biosintética extracelular amigable con el medio ambiente para la producción de nanopartículas de plata (AgNPs) mediante el uso de extracto foliar de *Eucalyptus camaldulensis* (*E. camaldulensis*). Los NPs se caracterizaron por los cambios de color y la espectroscopía UV-visible. Los efectos citotóxicos de las AgNPs preparadas se

detectaron contra cuatro tipos de bacterias patógenas, incluyendo dos bacterias Gram-negativas (*Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli*) y dos bacterias Gram-positivas (*Staphylococcus aureus* y *Bacillus subtilis*) mediante el método de difusión en pocillos de agar. Un valor máximo de absorción entre 400-450 nm para el extracto y el cambio de color a marrón oscuro correspondieron a la absorbancia plasmónica de AgNPs. Por otro lado, el extracto acuoso de hojas de *E. camaldulensis* podría ser eficaz contra los microorganismos probados que mostraron zonas de inhibición de 9.0-14.0 mm. Además, las AgNPs sintetizadas biológicamente tuvieron una mayor capacidad para suprimir el crecimiento de los microorganismos ensayados (12,0-19,0 mm). La síntesis extracelular de AgNPs mediada por extracto de hoja de *E. camaldulensis* tuvo una actividad bactericida eficiente contra las especies bacterianas ensayadas.

Otro estudio se utilizó un método de calentamiento convencional muy barato y sencillo para obtener las nanopartículas de hierro (FeNPs) utilizando el extracto de hojas de *Lawsonia inermis* y planta de *Gardenia jasminoides*. La actividad antibacteriana se estudió contra *Escherichia coli*, *Salmonella enterica*, *Proteus mirabilis* y *Staphylococcus aureus* mediante el método de difusión de pozos. Se sintetizaron nanopartículas de hierro con un tamaño promedio de 21 nm y 32 nm. Las nanopartículas de hierro sintetizadas en verde muestran una buena actividad antibacteriana contra los patógenos humanos *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* (Naseem y Akhyar, 2015).

La síntesis biológica de nanopartículas de plata a partir de una solución de nitrato de plata utilizando extracto de fruta de pepino (*Cucumis sativus*) la eficacia antibacteriana de estas nanopartículas se probó contra tres bacterias: *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*

y *Escherichia coli*. Estas nanopartículas de Ag biosintetizadas mostraron propiedades fotocatalíticas y antibacterianas efectivas al degradar el colorante e inhibir el crecimiento bacteriano, respectivamente. Además, el resultado del ensayo antibacteriano mostró que estas nanopartículas poseen propiedades bactericidas efectivas contra las cepas bacterianas probadas (Roy *et al.*, 2015).

Silva de Hoyos *et al.* (2012) investigaron que a partir de una nueva ruta de síntesis empleando la química verde, se obtuvieron nanopartículas de plata. Una solución coloidal de nanopartículas de plata se obtuvo a través de la reacción química entre el nitrato de plata (AgNO_3) y una solución acuosa de extracto de nopal (*Opuntia ficus indica*), el cual juega el papel de agente reductor y estabilizador. El tamaño promedio de las nanopartículas obtenidas fue de 23 nm. La cantidad de agente reductor y la temperatura utilizada durante la síntesis tiene un profundo efecto en el tamaño y la morfología de las nanopartículas, lo que resulta en un modo poco sofisticado de manipular esas características y, así, mejorar sus posibles aplicaciones.

Narvaez y Sanchez (2009) mencionan que se deben desarrollar nuevas tecnologías relacionadas con biocombustibles o nanopartículas (composiciones de fibras) para aumentar la eficiencia y reducir los costos en la industria del agave, las hojas se pueden utilizar para producir fibra, saponinas y otros compuestos químicos con diversas aplicaciones en las industrias del papel, la fabricación y la cosmética, entre muchas otras. Ponce *et al.* (2014) realizó un estudio de Nanopartículas de celulosa que fueron producidas desde hojas de agave deshidratadas por hidrólisis ácida, el estudio es importante para la fácil obtención de nanomateriales verdes desde residuos agroindustriales es claro que el material, obtenido del agave, tiene una cristalinidad

parcial. Las nanopartículas de celulosa podrían presentar una estructura cristalina triclinica para fibras de la pared celular de algas acuáticas (*Glaucocystis nostochinearum*)

Ponce *et al.* (2014) realizo un estudio de Nanopartículas de celulosa que fueron producidas desde hojas de agave deshidratadas por hidrolisis acida, el estudio es importante para la fácil obtención de nanomateriales verdes desde residuos agroindustriales es claro que el material, obtenido del agave, tiene una cristalinidad parcial. Las nanopartículas de celulosa podrían presentar una estructura cristalina triclinica para fibras de la pared celular de algas acuáticas (*Glaucocystis nostochinearum*).

Puiso *et al.* (2014) determinaron la actividad antimicrobiana de nanopartículas de plata sintetizadas utilizando los extractos de corteza de roble (*Quercus robur*) y baya de enebro (*Juniperus communis*) contra bacterias patógenas de *Listeria monocytogenes* ATCC 19111, *Bacillus cereus* ATCC 11778, *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Salmonella enterica subsp. enterica serovar typhimurium* ATCC 13076, *Esherichia coli* ATCC 25922 y 10 cultivos de *Bacillus cereus* aislados de productos alimenticios. Las bacterias gram-positivas fueron más sensibles a las nanopartículas de plata que las bacterias gram-negativas (los diámetros máximos de las zonas de inhibición fueron de $14,8\pm 0,1$ mm y $12,0\pm 0,2$ mm, respectivamente). Las nanopartículas de plata sintetizadas con extractos de bayas de enebro mostraron una mayor actividad antimicrobiana contra los cultivos transmitidos por alimentos. Las nanopartículas de plata sintetizadas utilizando extractos de corteza de roble demostraron una inhibición aproximadamente 1,5 veces más fuerte al cultivo de referencia de *B. cereus* ATCC 11778, frente a los cultivos de *B. cereus* aislados de productos alimenticios.

Belliraj *et al.* (2015) obtuvieron nanopartículas de oro (GNPs) a partir de vainas de *Moringa oleífera*, la eficacia antibacteriana demostró que la *Moringa* podía utilizarse en el tratamiento de infecciones causadas por patógenos como *S. aureus*, *E. coli*, *B. subtilis* y *K. pneumoniae*.

Villanueva *et al.* (2015) reportaron la síntesis verde de nanopartículas de cloruro de plata (AgCINPs) y nanopartículas de plata (AgNPs) a partir de extractos acuosos de cáscara de maíz como agente reductor y estabilizador. Investigó el efecto de los cambios en el volumen del extracto y el pH sobre la síntesis verde de estas nanopartículas. Las nanopartículas sintetizadas tuvieron actividad antibacteriana contra *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*.

Velusamy *et al.* (2015) ha investigado un método sencillo para la síntesis verde de nanopartículas de plata (AgNPs) utilizando extracto de goma del árbol neem (*Azadirachta indica*). Las nanopartículas de plata sintetizadas exhibieron actividad antibacteriana contra aislados clínicos de *Salmonella enteritidis* y *Bacillus cereus*.

El uso de *Trichoderma* en la agricultura es bien conocido por su actividad como controlador de fitopatógenos y promotor del crecimiento de las plantas. De hecho, el control biológico ha sido una propuesta revolucionaria para detener el uso de agroquímicos, pero aún existen algunas dudas sobre su implementación. Según Pasquoton *et al.* (2023), esta alternativa enfrenta obstáculos para alcanzar un éxito total, como la viabilidad de los microorganismos utilizados como agentes de bio-control, el almacenamiento del producto y la interferencia de productos combinados. Por lo que sintetizaron nanopartículas biogénicas de titanio utilizando el filtrado del hongo *Trichoderma harzianum* como agente estabilizador, para obtener una potencial actividad biológica contra fitopatógenos y principalmente estimular el crecimiento de *T. harzianum*, mejorando su eficacia para el control biológico. Las nanopartículas con crecimiento

residual de *T. harzianum* mostraron potencial inhibitorio contra el crecimiento micelial de *Sclerotinia sclerotiorum* y la formación de nuevas estructuras resistentes. Los microorganismos de importancia agrícola no se vieron afectados por la exposición a las nanopartículas, sin embargo, se observó una disminución en el número de bacterias cicladoras de nitrógeno. Con respecto a la fitotoxicidad, las nanopartículas no causaron cambios morfológicos y bioquímicos en las plantas de soja (*Glycine max* L. Merrill).

Pardo *et al.* (2022) utilizaron extractos de las hojas de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) para la síntesis de nanopartículas de plata (NPs-Ag) con la finalidad de producir un compuesto antimicrobiano para usarse como conservante de fruta, en este caso, manzana roja (Red delicious). Se emplearon dos cepas bacterianas en los ensayos antimicrobianos realizados, la gramnegativa (*Escherichia coli*) y la grampositiva (*Staphylococcus aureus*) para comprobar la actividad antimicrobiana de las NPs-Ag. Para *E. coli* se obtuvo una mejor actividad antibacteriana con un halo de inhibición de 3,21 mm. Posteriormente se usaron las NPs-Ag en la fruta para determinar su uso como conservante, usando la cera de abeja como control untada en la superficie de las frutas, observándose que las nanopartículas sintetizadas alargaron el tiempo de maduración de las frutas. Las NPs-Ag retrasaron el proceso de maduración de la fruta, conservando su color y peso inicial desde el día 1 hasta el día 30. La caracterización realizada mediante espectrofotometría UV-VIS demostró que las proporciones 5:5 y 5:10 fueron las mejores debido a que presentaron longitudes de ondas entre 212-418 nm y mayor estabilidad en el tiempo. El análisis mediante microscopía electrónica de barrido evidenció nanopartículas de forma esférica de 10 nm de diámetro.

Dutta *et al.* (2018) demuestran el efecto fitoestimulador de las nanopartículas de plata (AgNPs) sintetizadas a partir del extracto de rizoma de *Curculigo orchioides* sobre el crecimiento de las plántulas de arroz. La incorporación de AgNPs biosintetizadas en el medio mejoró el crecimiento de las plántulas de arroz, lo que se evidenció por el aumento de la biomasa y la promoción de la ramificación de las raíces. El presente estudio corrobora el papel potencial de las AgNPs biosintetizadas en la estimulación del crecimiento sin ningún impacto tóxico generalmente asociado con las AgNPs sintetizadas química y físicamente. Por lo tanto, los efectos perjudiciales de la exposición a AgNPs en diferentes escenarios de crecimiento y desarrollo de las plantas pueden ser regulados por su fuente de origen. La mejora del crecimiento de las plántulas tras la exposición a AgNPs se asoció con una disminución de los niveles de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y peroxidación lipídica. Los niveles diferenciales de actividades enzimáticas antioxidantes y los patrones de expresión génica en respuesta a la presencia y ausencia de AgNPs indicaron su participación en la regulación de la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y su eliminación hacia la estimulación del crecimiento. La enzima antioxidante catalasa (CAT) y, en particular, las enzimas del ciclo glutatión-ascorbato (AsA-GSH) desempeñan un papel crucial en la protección de las células contra el estrés oxidativo y la estimulación concomitante del crecimiento de las plántulas.

Dzul *et al.* (2018) reportaron el uso del extracto acuoso de una planta conocida comúnmente como “chaya maya” (*Cnidocolus chayamansa* Mc Vaugh) para la síntesis de NP de plata. Planta abundante en la Península de Yucatán, cuyas propiedades nutricionales y medicinales se han empleado a lo largo de la historia de la región, principalmente por la civilización maya para el tratamiento de algunos padecimientos. De acuerdo con Dzul *et al.* (2018) esta planta es rica en proteínas, vitaminas y aminoácidos esenciales como lisina, fenilalanina y metionina,

entre otros. Mencionan que posee importantes cantidades de vitaminas, como A y C, lo cual permite que su poder antioxidante se incremente, lo cual la hace una adecuada candidata para realizar procesos de óxido-reducción necesarios para la biosíntesis de NP de Ag. Estos autores recolectaron las hojas más verdes de los arbustos de esta planta, descartando el material vegetal visiblemente maltratado. Las hojas fueron separadas en lotes de 100 g (base húmeda) y fueron lavadas; posteriormente, las deshidrataron y molieron. Prepararon las nanopartículas de plata (NPAg) con una solución de nitrato de plata (AgNO_3) a una concentración de 0.0282 M como precursor metálico en 10 mL de cada uno de los extractos, agitados manualmente, y en reposo a temperatura ambiente sin exposición a la luz. Evaluaron la formación de NP en función del tiempo mediante UV-Vis, a 0.5, 1, 2, 3, 4, 20, 24 y 92 h. Observaron el cambio en la coloración de la solución debido a las vibraciones de excitación del plasmón superficial de las NP. Mencionan que es posible sintetizar NPAg a partir del extracto acuoso de chaya y que la concentración del extracto influye en la forma y tamaño de las NP. Concluyen que los metabolitos implicados en la capacidad antioxidante y reductora fueron los flavonoides presentes en el extracto crudo de la chaya.

Extractos de *Argemone mexicana* L. para la biosíntesis de nanopartículas de oro (NPAu) y plata (NPAg) contra bacterias resistentes a antibióticos y *Candida albicans* La amapola espinosa (*Argemone mexicana* L.), comúnmente conocida como chicalote o cardosanto, es una planta mexicana empleada por la medicina tradicional mexicana en el tratamiento de enfermedades relacionadas con infecciones gastrointestinales y de la piel. Téllez *et al.* (2021) También, reportaron que *Argemone mexicana* L. contiene compuestos que han demostrado propiedades antiinflamatorias y antimicrobianas como la protopina, baberina y sanguinarina. Además, esta planta contiene una alta presencia de metabolitos secundarios entre los que se encuentran

compuestos fenólicos, particularmente flavonoides y taninos con actividad antibacteriana contra cepas de *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, que ya presentan resistencia a los antibióticos. También reportan que es eficaz contra el protozoo *Trichomonas vaginalis*, responsable de la tricomoniasis en humanos. La combinación de las propiedades medicinales que ofrecen algunas plantas y los NM, principalmente las NP, se ha vuelto una buena alternativa y tendencia en investigación en el combate a la resistencia antimicrobiana. La utilización de un extracto vegetal de *A. mexicana* L. (colectada en Querétaro, México), donde el material vegetal fue deshidratado, pulverizado y aislado de la exposición a la luz. Los extractos fueron preparados con 10 g de material vegetal pulverizado en 150 mL de 2-propanol (alcohol isopropílico) vía extractor Soxhlet. La fracción líquida que obtuvieron fue evaporada a 40 °C, lo obtenido fue almacenado a 4 °C en oscuridad. Para la biosíntesis de NP_{Ag} reportan una mezcla de 3 mL de AgNO₃ a una concentración 1 mM con 3 mL de extracto que se ajustó a 100 ppm con agua destilada, esta mezcla fue agitada a dos temperaturas: a 25 °C como punto de ajuste inferior y a 80 °C como ajuste superior durante 30 minutos. El producto de la reacción fue evaluado mediante espectroscopía UV-Vis. Para las NP_{Au}, reportan la misma técnica, con la diferencia de un ajuste en el precursor metálico (cloruro de oro (III) a una concentración 1 mM). El principal indicador de la síntesis de NP fue el cambio de color, observaron un cambio de coloración de verde a café revelando la presencia de NP_{Ag} y de rosa a morado para las NP_{Au}, después de 30 minutos de reacción, a través de un cambio en la longitud de onda, de 420 nm para NP_{Ag} y 520 nm para NP_{Au}. Concluyeron que el extracto de *A. mexicana* L. permite la síntesis de NP de oro y plata, que las moléculas orgánicas de los extractos aumentan el efecto de inhibición en el crecimiento de bacterias, tanto en las cepas silvestres como en las resistentes, también mostraron una alta actividad contra *Candida albicans*, por lo que el

producto derivado de esta planta puede ser una importante alternativa para producir antibióticos más eficientes.

Dysphania ambrosioides L. para la biosíntesis de NP de zinc con propiedades antibacterianas

Dysphania ambrosioides L. es conocida comúnmente como epazote, es una planta muy importante para la cocina mexicana, aunque también ha sido considerada como una planta arvense. Para la medicina tradicional, el uso de la infusión de epazote ayuda al tratamiento de enfermedades gastrointestinales, para reducir los procesos inflamatorios y como desparasitante. Álvarez *et al.* (2020) reportaron que los metabolitos presentes en *Dysphania ambrosioides* como los terpenos, polifenoles, alcaloides, ácidos fenólicos y proteínas tienen un papel muy importante en la biosíntesis de NP productoras de iones metálicos. Ellos consiguen la biosíntesis de NP de óxido de zinc (NPZnO), buscando combinar las propiedades del ZnO para el transporte y estabilización de fármacos, debido a propiedades efectivas en el tratamiento de irritaciones y heridas superficiales en la piel por sus agentes astringentes y antibacterianos; además, con el extracto de *D. ambrosioides* se acelera de reparación de heridas en la piel por su regeneración celular. Estos autores reportan que el material vegetal fue preparado colocando 20 g de hojas secas de epazote en 200 mL de agua desionizada durante 2.5 h a temperatura ambiente sin agitación; posteriormente, la mezcla fue agitada a las 2 h a 40 °C y 50 rpm. Para la biosíntesis fueron colocados 100 mL del extracto obtenido en 3.5 g de $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ y se agitó a 60 °C por 2 h a 1,500 rpm. Observaron un cambio de color en la solución, que después fue centrifugada a 8,000 rpm por 10 minutos. La pastilla fue enjuagada con agua desionizada y se dejó secar en una estufa a 50 °C por 6 h dejando un polvo de tonalidad blanco pálido. Los autores reportaron que los compuestos involucrados en la biosíntesis fueron los flavonoides y terpenos. Las NPZnO que se sintetizaron fueron de un tamaño de 5 a 30 nm. Evaluaron las

propiedades antibacterianas, mediante el método de Kirby-Bauer (prueba de difusión por discos), las cuales indicaron que la mayoría de las cepas bacterianas utilizadas en el estudio fueron susceptibles a estas NP, siendo la cepa *Prevotella intermedia* la que mayor inhibición mostró en el ensayo y fue susceptible a NPZnO.

Extracto de desecho de cártamo (*Carthamus tinctorius L.*) para la biosíntesis de NP de plata. El cártamo es una planta de gran importancia industrial debido a la extracción de aceite a nivel comercial, igualmente, los pétalos son empleados como pigmentos naturales en el área alimenticia. Sin embargo, más del 80% del cultivo es considerado un desecho agroalimentario después de la obtención de la semilla. El cártamo es una especie importante en México, entre los compuestos que se han aislado del cártamo son los flavonoides, quinocalconas, poliacetilenos, alcaloides, ácidos grasos, esteroides, lignanos, proteínas, y polisacáridos, siendo los dos primeros los que han mostrado una actividad antioxidante importante. Rodríguez *et al.* (2021) dieron a conocer el uso del extracto acuoso a partir de los desechos de cártamo, compuesto de una mezcla de tallos y hojas obtenidas después del proceso de recolección de semillas a los 150 días después de la siembra. Los autores reportan que obtuvieron NP de forma esférica. Estas NP mostraron la capacidad de inhibir el crecimiento bacteriano de *Staphylococcus aureus* como patógeno y de *Pseudomonas fluorescens*.

Ledezma *et al.* (2014), reportaron el extracto acuoso de nopal (*Opuntia sp.*) para la biosíntesis de NPs de plata. El precursor metálico que reportan fue AgNO₃, evaluaron la temperatura y la concentración de este precursor para monitorear la formación de NPs de plata, para estabilizar usaron el polivinil alcohol. Concluyeron que es posible obtener NP de Ag en tamaños de 4 a 28 nm, donde el tamaño promedio fue 10 nm, mismas que mostraron actividad antibacteriana y fungicida frente a cepas como *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Aspergillus niger*.

La síntesis biogénica de nanopartículas de óxido de cobre (CuO) y óxido de zinc (ZnO) se logró utilizando la bacteria del suelo, *Stenotrophomonas maltophilia*. El objetivo fue buscar la concentración óptima de aplicación de nanopartículas de CuO y ZnO; en la germinación de las semillas *Amaranthus hybridus* en condiciones de hidroponía y aplicación foliar; y los cambios en los caracteres fenotípicos y pigmentos; en la actividad enzimática antioxidante; y la absorción de cobre y zinc en la planta. Se descubrió que las nanopartículas biogénicas de ZnO mejoran la tasa de germinación de las semillas en un 39%, mientras que las nanopartículas de CuO ejercen un efecto contrario. Las plantas de girasol híbrido tratadas con nanopartículas de CuO y ZnO mostraron mayor crecimiento, fotosíntesis y actividades antioxidantes, pero el tratamiento con nanopartículas de ZnO tuvo una mayor influencia. El uso eficiente de nanopartículas de CuO y ZnO sintetizadas verdes como nanofertilizantes al mejorar las características agronómicas de *Amaranthus hybridus* tanto en hidroponía como en aplicación foliar, mostró que las plantas bajo aplicación hidropónica de nanopartículas tuvieron una media estadísticamente significativamente mayor de parámetros agronómicos, síntesis de antioxidantes, así como acumulación de iones de cobre y zinc en comparación con de aplicación foliar. El sistema hidropónico de aplicación de fertilizantes demostró una mejor eficiencia en términos de crecimiento en comparación con la aplicación foliar. La alta concentración de antioxidantes exhibida por las plantas tratadas con nanopartículas de CuO y ZnO garantiza una mayor resistencia de la planta a infecciones y plagas al tiempo que promueve el crecimiento de la planta. Las nanopartículas biogénicas se pueden utilizar como fertilizantes eficientes, lo que da como resultado un rendimiento de mayor calidad y cantidad al tiempo que se protege el medio ambiente (Francis *et al.*, 2022).

5.8. Efecto de los nanomateriales sobre los microorganismos del suelo

Los componentes del suelo tales como el material coloidal y la fracción mineral pueden interactuar fuertemente con los nanomateriales (NMs), han influido en forma sólida o líquida en el sistema edáfico (Molina, 2016).

Existen dos formas de agregación: homoagregación (interacción entre NMs) y heteroagregación (interacción entre NMs y otras partículas presentes en el ambiente). La heteroagregación es más recurrente en el suelo que la homoagregación y se ve favorecida especialmente en la región del pH entre el punto de carga cero (PCC) de los coloides en el suelo y los NMs. La materia coloidal y los minerales en el suelo, especialmente la arcilla y los minerales de Fe, son considerados como importantes sumideros de NMs. Por otro lado, la materia orgánica (MO) ha mostrado ejercer efectos importantes sobre el destino y comportamiento de los NMs a su llegada en el suelo, debido fundamentalmente a fenómenos de absorción y estabilización (Sun *et al.*, 2021). La absorción de NMs por la MO reduce significativamente la toxicidad de estos debido a la disminución del área activa de los materiales, mitigando su potencial efecto tóxico en el ambiente. Tal es el caso del estudio publicado por Rippner *et al.* (2018) en el que se demostró que la MO reduce la biodisponibilidad de NPs de CuO inhibiendo el efecto tóxico hacia Lentejita de agua grande (*Landoltia punctata*).

La rizosfera está definida como la porción del suelo en la que se median las interacciones entre los microorganismos y la zona radicular de las plantas; esta área se extiende no más allá de 3-5 mm de la superficie de la raíz. (Qu *et al.*, 2020).

Los microorganismos del suelo son buenos indicadores de la calidad de suelo, estos afectan la calidad de la MO y median el ciclaje de nutrientes (Moreau *et al.*, 2019; Pratama *et al.*, 2020).

La toxicidad de los NMs y su efecto sobre la actividad microbiana es variable y depende de la naturaleza de estos, por ejemplo, los de tipo inorgánico (óxidos metálicos y metales) presentan mayor potencial tóxico que los de naturaleza orgánica (fulerenos y nanotubos de carbono) (Chen *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2018).

Las relaciones simbióticas microorganismos-plantas en presencia de NMs y asociadas con el crecimiento, desarrollo y productividad de cultivos han sido evaluadas. El contacto de NMs en cultivos microbianos puros demostró tener efectos inhibitorios en el crecimiento de rizobacterias promotoras del crecimiento (PGPR) además de otras bacterias involucradas en el ciclo del N (Ameen *et al.*, 2021). En otro estudio se demostró que las NPs de óxidos metálicos tales como TiO_2 y ZnO , usadas en el sector agrícola como agentes antimicrobianos y fertilizantes, causaron la reducción de la biomasa microbiana (BM), medida como C orgánico presente en la biomasa (C-BM), especialmente el proveniente de bacterias gram negativas (Zhou *et al.*, 2020). Otros estudios han recurrido a la evaluación del efecto de NMs sobre suelo directamente, por ejemplo, empleando NPs de TiO_2 y ZnO a diferentes concentraciones durante 60 días (Ge *et al.*, 2011); el estudio indicó que las NPs redujeron significativamente la concentración de C-BM; concluyendo que esta reducción se vio reflejada como la disminución de la actividad microbiana y enzimática, así como a la modificación de la estructura poblacional. Respecto a NMs de naturaleza orgánica, se ha demostrado que estos muestran un impacto mínimo sobre la concentración de C-BM.

Algunos estudios han demostrado efectos positivos de las NPs sobre las poblaciones microbianas al exponerse a bajas concentraciones de ZnO y CuO (10 mg kg^{-1} de suelo). Se concluyó que las NPs incrementaron la actividad enzimática y el número de bacterias y hongos en el suelo expuesto (Josko *et al.*, 2019).

Otros estudios coinciden en que ciertos nanomateriales (Ag, Al₂O₃, TiO₂, CuO, y ZnO) han mostrado tener impacto negativo sobre las comunidades microbianas del suelo, mientras que otros tales como Si, Fe, Au, y Pd. han tenido efectos mínimos o no los presentan (El Shetehy *et al.*, 2021; Moll *et al.*, 2017).

Molina *et al.* (2023) desarrollaron un prototipo de sensor para la medición de mercurio (Hg²⁺) en solución acuosa sobre una plataforma electroquímica basada en electrodos serigrafados de nanotubos de carbonos (CNT-SPE) en conjunto con nanopartículas de oro (NPs-Au) realizadas a través de síntesis verde, utilizando extracto acuoso de macro alga o sargazo (*Sargassum spp.*). Las NPs-Au se utilizaron para modificar el CNT-SPE a través del método drop-casting y así ensamblar un novedoso sensor electroquímico para la medición de Hg²⁺, cuya validación y habilidad para medir fue demostrada utilizando voltametría diferencial de pulso (DPV). Los resultados demuestran que la plataforma desarrollada es una alternativa, rápida, eficiente y portátil para detectar niveles bajos de mercurio en solución acuosa (0.477 ppm) que se pueden encontrar en muestras de alimentos, suelos, sangre; con previa preparación de las muestras, de manera sensible, confiable y de bajo costo, al emplear pequeños volúmenes de muestra.

La producción de nanobiocompuestos ha sido reconocida recientemente con la obtención de celulosa. Hernández *et al.* (2023) obtuvieron y caracterizaron nanocelulosa a partir de cascarilla del arroz (*Oryza sativa L.*) Var. “Morelos A-2010”, considerada como residuo contaminante. La cascarilla de arroz fue tamizada, procesada mediante extracción alcalina, blanqueada y procesada por un pretratamiento ácido. A la celulosa obtenida se le realizó una hidrólisis ácida (H₂SO₄) y un tratamiento de sonicación para producir nanocelulosa. Se obtuvieron rendimientos de 29 a 41% de celulosa, con posterior conversión en nanocelulosa con cristales

de 86 a 173 nm, concluyendo así, que este residuo puede tener un manejo sostenible y convertirse en un producto reciclable de alto potencial.

5.9. Efectos toxicológicos en los seres vivos

Algunas ventajas de estos nanomateriales en los sistemas agrícolas, están relacionadas por ser buenos transportadores de sustancias, que benefician a la planta, eliminando plagas que atacan los cultivos. Sin embargo, las NPs inorgánicas tienen consecuencias negativas las cuales se asocian principalmente a la toxicidad, afectando el crecimiento y funcionamiento de la planta debido al estrés que genera la adición de los materiales. La toxicidad se ve afectada por parámetros que deben ser bien estudiados como lo es la concentración, la forma y el tamaño de las nanopartículas (Ranjan *et al.*, 2021).

Se presenta la toxicidad potencial de algunos nanomateriales relevantes (plata, dióxido de titanio, óxido de zinc, sílice y nanotubos de carbono). Los efectos de los nanomateriales de plata parecen estar relacionados con la liberación de iones de plata de estos materiales. Los estudios también sugieren la formación *in vivo* de nanopartículas de plata tras la absorción de iones de plata. Los estudios de toxicidad del dióxido de titanio muestran que puede ser biodisponible tras la exposición oral, pero que se desconoce la tasa de translocación y que la genotoxicidad muestra resultados contradictorios. Del óxido de zinc administrado por vía oral sólo parecen absorberse pequeñas cantidades, muy probablemente en forma iónica. El zinc absorbido parece eliminarse de los órganos al cabo de 7 días. La sílice amorfa sintética es una forma importante de sílice utilizada en muchos alimentos y las revisiones más recientes sugieren seguridad para los consumidores cuando se exponen a través de los alimentos. Los estudios *in vivo* con nanotubos de carbono no muestran ninguna absorción, mientras que los estudios *in*

vitro sugieren la absorción en células, aunque no la capacidad de atravesar la pared intestinal. En todos los casos persisten incertidumbres y resultados contradictorios. (Peters *et al.*, 2014).

Los estudios también han demostrado que las nanopartículas pueden entrar en los organismos durante la ingestión o la inhalación y pueden trasladarse dentro del cuerpo a diversos órganos y tejidos donde las nanopartículas tienen la posibilidad de ejercer la reactividad que se traduce en efectos toxicológicos. Aunque algunos estudios también han abordado los efectos toxicológicos de las nanopartículas en las células animales y vegetales, los estudios toxicológicos realizados hasta la fecha con nanopartículas magnéticas en plantas siguen siendo limitados. Los usos de las nanopartículas de Ag en numerosos productos de consumo hacen que se liberen al medio acuático y se conviertan en una fuente de Ag disuelta, lo que ejerce efectos tóxicos sobre los organismos acuáticos, incluidas las bacterias, las algas, los peces y las dafnias es un crustáceo llamado pulga de agua (Navarro *et al.*, 2008). El sistema respiratorio representa un objetivo único para la toxicidad potencial de las NP debido a que además de ser la puerta de entrada de las partículas inhaladas, también recibe todo el gasto cardíaco (Ferreira *et al.*, 2013). Las nanopartículas se utilizan ampliamente en aplicaciones biológicas, pero a pesar del rápido progreso y la aceptación temprana de la nanobiotecnología, aún no se ha establecido el potencial de efectos adversos para la salud debido a la exposición prolongada a diversos niveles de concentración en humanos en el medio ambiente. Una de las toxicidades de las nanopartículas es la capacidad de organizarse alrededor de la concentración de proteínas que depende del tamaño de las partículas, la curvatura, la forma y las características de la superficie: carga, grupos funcionalizados y energía libre. Debido a esta unión, algunas partículas generan resultados biológicos adversos a través del desdoblamiento de proteínas, fibrilación, reticulación de tioles y pérdida de actividad enzimática.

De acuerdo con Cota *et al.* (2015) es y será difícil conocer el destino final de los NMs manufacturados e incluso su comportamiento, debido, principalmente, a la falta de información acerca de los fenómenos y mecanismos involucrados en la cadena trófica o en cualquier vía de interacción entre el suelo, las plantas y los humanos, en los sistemas acuáticos y de agricultura. En diversas situaciones, los NM se les considera como materiales peligrosos debido a que los han reportado con efectos adversos, como los polímeros, como es el poliestireno a diferentes tamaños de partículas. Se reporta un incremento en la entrada de neutrófilos en el pulmón de las ratas después de una instilación de partículas de 64 nm en comparación con las NPs de 202 y 535 nm, esto se debe no solo al efecto del tamaño del material, sino, muy probablemente, al efecto de la naturaleza del material y sus propiedades; por un lado, es un material sintetizado, químicamente desconocido para la naturaleza de las células, y, por otro, son estudios en condiciones cerradas, esto es, se trata de un evento inducido y, en cierto grado, forzado para las células, de manera que carecen de la información completa como sistema para reconocer un cuerpo extraño como lo es un NMs (Cota *et al.*, 2015; Brown *et al.*, 2001).

VI. CONCLUSIÓN

Con la información presentada, reciente y novedosa, se ha mostrado que se continúan investigando los efectos controversiales en el tema de las nanopartículas aplicadas a la agricultura, pero sin duda alguna, en los próximos años, con la aparición y ayuda de nuevos instrumentos, nuevas metodologías y trabajo multidisciplinario, las nuevas investigaciones mostrarán evidencia de los efectos que provoca en el área de la agricultura y en la agroindustria.

La nanotecnología pretende ser una buena estrategia para mitigar algunos problemas que enfrenta la agricultura a causa del cambio climático, los efectos bióticos y abióticos, gases de efecto invernadero, entre otros, ya que ofrecen incrementar la producción y seguridad de alimentos, además brinda la posibilidad de generar nanofertilizantes y promotores del crecimiento, permite detectar la presencia de plagas y enfermedades, contaminación de alimentos y aplicar la cantidad correcta de nutrientes y pesticidas que promuevan la productividad, al mismo tiempo que garanticen la seguridad del medio ambiente y una mayor eficiencia en el uso de insumos agrícolas, la purificación de agua es otro beneficio que se tiene al utilizar nanopartículas, así como la detección de actividad microbiana, mitigar efectos adversos del estrés biótico y abiótico, reducir pérdidas postcosecha. Pero, aunque se ha logrado sintetizar nanopartículas (NPs) a partir de procesos físicos, químicos y biológicos, la mayoría de estos métodos aún presentan deficiencias en la producción de NPs, además que la utilización de estas rutas de producción genera costos elevados de materiales, equipos, reactivos, etc., además de que los residuos en algunos tipos de síntesis son dañinos, tanto para la salud como para el medio ambiente, es por esto que las rutas verdes se presentan como una estrategia prometedora para dar solución a las problemáticas que conlleva sintetizar NPs., y en combinación con la agricultura de precisión promete ser una excelente alternativa para una

agricultura más precisa, con máximos rendimientos y mínimo desperdicio, ya que monitorea, controla, identifica en tiempo real, las condiciones en las que se encuentra algún cultivo, proceso o producto.

En la gran mayoría de los estudios realizados, se puede concluir que al utilizar nanopartículas mayores a 500 nm éstas tienden a ser tóxicas. Es por eso que se sugiere seguir con investigaciones de los efectos de las nanopartículas o nanomateriales dentro de la agricultura, ya que la gran mayoría de los estudios se llevan a cabo en ambientes controlados.

VII. REFLEXIONES

Los problemas que enfrenta la agricultura en la actualidad son: el cambio climático, erosión y degradación de los suelos, contaminación del suelo, aire y agua, y pérdida de la diversidad genética. Por lo que el uso de la tecnología debe estar muy presente para cumplir con la demanda de alimentos para la población; por lo que la nanotecnología jugará un papel fundamental en la producción agrícola sostenible.

Hoy en día, las nanopartículas diseñadas se utilizan en un amplio campo de la industria alimentaria como en nutrición: el cual va desde la reducción del contenido grasa/azúcar en los alimentos, la liberación controlada de aditivos en sitios específicos del cuerpo, hasta la adición de vitaminas y/o minerales generando nuevos productos con mejores sabores, aromas y texturas. La elaboración de empaques innovadores, ligeros y resistentes, empaques activos con propiedades antimicrobianas, etiquetas inteligentes que indiquen la degradación de alimentos, entre otros. El uso de los nanosensores integrados en el embalaje detectan la contaminación de los alimentos y muestran los cambios mediante color o fluorescencia. La nanoencapsulación de nutrientes como vitaminas, minerales, antioxidantes y sabores en la matriz alimentaria a través de técnicas como nanoemulsiones, nanoliposomas, vesículas bicapa, mejora su estabilidad y liberación controlada en los productos alimenticios. La seguridad en dispositivos para evitar adulteración en los alimentos, diagnóstico sensorial para la detección de contaminante en los alimentos (Las partículas de nanoplatina incorporadas en los envases de alimentos y películas de embalaje proporcionan protección antimicrobiana y evitan la contaminación). Las nanopartículas magnéticas se unen y detectan patógenos como *Salmonella* y *E. coli* en muestras de alimentos en cuestión de minutos para realizar controles de calidad. La fijación de enzimas sobre nanomateriales como nanopartículas de silicato

conserva su actividad y reutilización durante la síntesis de jarabes de azúcar, ácidos orgánicos y aminoácidos utilizados en el procesamiento de alimentos. Se han producido los nanofiltros que eliminan contaminantes microscópicos durante el procesamiento del vino, la cerveza y los jugos de frutas. Los nanorrecubrimientos minimizan la adhesión bacteriana en las máquinas y previenen la corrosión. Las matrices de nanosensores impresos de bajo costo basadas en nanopartículas de oro y silicio que cambian de color para detectar los gases liberados durante la descomposición de los alimentos. Los kits de nanosensores portátiles identifican contaminantes y alérgenos.

La nanotecnología aplicada a la agricultura ha generado el uso de nanofertilizantes, nanosensores, nanopesticidas y nanomateriales, en los cuales se consideran factores importantes como controlar la liberación de agroquímicos con una pérdida mínima de nutrientes y mejorar la morfogénesis de las plantas al dirigirse a órganos celulares particulares de las plantas. El uso de nanofertilizantes (extremadamente solubles, que proporcionen una concentración precisa y una liberación lenta de nutrientes debido a una mayor superficie) que puedan eliminar o disminuir problemas como la lixiviación de nutrientes y contaminación ambiental.

Las NPs pueden generar resistente a enfermedades y plagas, mejorar la absorción de nutrientes, actuar como portador de varios compuestos vitales y mejorar la eficacia de los pesticidas y fertilizantes, las nanopartículas se describen como un dispositivo nanométrico capaz de conectarse a cualquier organismo, metal o compuesto, que necesite ser detectado para transmitir una señal eléctrica, mecánica, acústica, colorimétrica, térmica u óptica. A pesar de que existe información disponible sobre materiales nanométrico individuales, el nivel de toxicidad de muchas nanopartículas sigue siendo indefinible, por lo que la aplicación de estos

materiales está limitada debido a la falta de conocimiento sobre las evaluaciones de riesgo y los efectos en la salud humana. Es necesario el desarrollo de una base de datos integral y un sistema de alerta, así como la cooperación internacional para la regulación y legislación, para la explotación de esta tecnología y siempre se tiene que tomar en cuenta lo que se puede lograr con los agroquímicos actuales y buenas prácticas agronómicas y esta nueva tecnología. Es importante una evaluación crítica del potencial real para asegurar que los esfuerzos y la inversión se dirijan a aplicaciones que sean competitivas y aborden problemas existentes. En muchos países, los agricultores tienen un acceso limitado a las innovaciones, tecnología, conocimientos e información necesarios para mejorar la productividad y los ingresos

Sin embargo, aunque los beneficios de los nanofertilizantes sin duda están abriendo nuevos enfoques hacia la agricultura sostenible, sus limitaciones también deben considerarse cuidadosamente antes de su implementación en el mercado, ya que no todos los nanomateriales serán igualmente seguros para todas las aplicaciones. Los riesgos de los nanofertilizantes deben examinarse cuidadosamente antes de su uso, y se requieren más avances biotecnológicos para una aplicación correcta y segura de los nanomateriales en la agricultura (Zulfiqar *et al.*, 2019).

Las nanopartículas metálicas han mostrado ser una alternativa altamente eficiente para el control de estos microorganismos, ya que pueden penetrar las paredes celulares de las bacterias causando su muerte celular (Britto *et al.*, 2022).

Las NPsAg tienen aplicaciones en la micropropagación para reducir la contaminación de los cultivos in vitro, inhibir los efectos de etileno ocasionados por el cierre hermético de los recipientes utilizados en la agricultura para envasado de alimentos y promover el desarrollo durante la micropropagación, también conocido como hormesis. Además, las NPsAg tienen una

aplicación potencial en agricultura para la eliminación de enfermedades causadas por virus, hongos y bacterias. Sin embargo, se requieren estudios sobre sus efectos genotóxico y citotóxico en plantas cuando son aplicadas a concentraciones elevadas y sus posibles efectos en microorganismos benéficos que habitan en el medio ambiente. Por último, el uso de las NPsAg podría tener aplicaciones futuras al medio ambiente sobre la reducción de la contaminación del agua y suelo (Bello y Spinoso, 2023).

Dentro de las limitaciones de los plaguicidas, se pueden mencionar la baja eficiencia en su aplicación y reducida especificidad contra plagas, trayendo como consecuencia el desarrollo de resistencia de la maleza y organismos patógenos e insectos. Los pesticidas organofosforados ayudan a prevenir o eliminar bacterias e insectos, por lo que se usan ampliamente en la producción agrícola. Sin embargo, el uso ilegal y los problemas con los residuos de pesticidas organofosforados contribuyen a la contaminación ambiental global y representan una amenaza para la seguridad de la salud pública (Hong *et al.*, 2020).

No obstante, se han identificado algunos riesgos a la salud humana asociados con el uso de NPs, dentro de los que se resaltan: 1) la absorción vía dérmica de NPs debido a su tamaño, pudiendo atravesar la membrana celular; 2) ingreso al cuerpo vía inhalatoria pudiendo almacenarse en pulmones y translocarse al cerebro a través de la corriente sanguínea; 3) permanencia y reactividad potencial de algunos NMs, y, 4) conocimiento limitado sobre las consecuencias ambientales y de salud ante la exposición a los NMs (Chaud *et al.*, 2021; Kah *et al.*, 2021).

VIII. REFERENCIAS DE CONSULTA

- Abdul, R.; Nurina, A.; Nur, H. O.; Muhammad, S. M. S.; Aidah, J.; Napisah, S.; Woei J. L. 2022. Agricultural and industrial waste-derived mesoporous silica nanoparticles: a review on chemical synthesis route. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol 10(2): 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107322>.
- Álvarez, C. R.; García. P. V.I.; Álvarez, P. M.A.; Arenas, A. J.A. 2020. Green synthesis of ZnO nanoparticles using a *Dysphania ambrosioides* extract. Structural characterization and antibacterial properties. *Materials Science & Engineering C*. pp 1-36. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111540>.
- Ameen, F.; Alsamhary, K.; Alabdullatif, J. A.; ALNadhari, S. 2021. A review on metal-based nanoparticles and their toxicity to beneficial soil bacteria and fungi. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol. 213: 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112027>.
- An, J.; Hu, P.; Li, F.; Wu, H.; Shen, Y.; White, J.C.; Tian, X.; Li, Z.; Giraldo, J. P. 2020. Emerging Investigator Series: Molecular mechanisms of plant salinity stress tolerance improvement by seed priming with cerium oxide nanoparticles. *Environmental Science: Nano*. pp. 1-51. DOI:10.1039/D0EN00387E.
- Andrade, G.M.L.; López, L.L.I.; Sáenz, G.A. 2012. Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*. Vol. 43(3): 9-18.
- Anzaldo, M. M.; Hernández, G. Y.I.; Hernández, M. L.G.; Hernández, A. L. 2024. Agronanotechnology in the arid zones of northern Mexico: Research, challenges, and

new trends. Journal of the Professional Association for Cactus Development. Vol 26: 1-29. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v26i.534>

Aqel, A.; El-Nour, K.M.M.A.; Ammar, R.A.A.; Al-Warthan, A. 2012. Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation. Arabian Journal of Chemistry. Vol 5: 1–23. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.08.022](http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.08.022).

Asgari, F.; Majd, A.; Jonoubi, P.; Najaf, F. 2018. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). Plant Physiology and Biochemistry. Vol. 127: 152-160.

Astefanej, A.; Núñez, O.; Galceran, M.T. 2015. Characterisation and determination of fullerenes: A critical review. Analytica Chimica Acta. Vol. 882: 1-21

Belliraj, T.S.; Nanda, A.; Ragunathan, R. 2015. In-vitro hepatoprotective activity of *Moringa oleifera* mediated synthesis of gold nanoparticles. J. Chem. Pharm. Res. Vol. 7 (2): 781–788.

Bello, B. J.J.; Spinoso, C. J.L. 2023. Utilización de nanopartículas de plata en la micropropagación de plantas. Mundo Nano. Vol. 16(30): 1e-14e.

Berekaa, M.M. 2015. Nanotechnology in Food Industry; Advances in Food processing, Packaging and Food Safety. Int J Curr Microbiol App Sci. Vol. 4(5): 345-357.

Britto, H. M.; Cortez, V. M.; Flores, A. M. 2022. Aplicaciones tecnológicas de las nanopartículas en la medicina e industria. EPISTEMUS. Vol. 16(33): 46-54.

Brown, D. M.; Wilson, M. R.; MacNee, W.; Stone, V.; Donaldson, K. 2001. Size-de-pendent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and

oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicology and applied pharmacology*. Vol. 175(3): 191-199. <https://doi.org/10.1006/taap.2001.9240>.

Caixeta, O. H.; Stolf, M. R.; Reis, M. C.B; Grillo, R.; Bispo, J. M.; Fernandes, F. L. 2015. Nanoencapsulation Enhances the PostEmergence Herbicidal Activity of Atrazine against Mustard Plants. *PLoS ONE*. Vol. 10(7): 1-12.

Caro, L. F.J.; López, L. L.M.; Lizardi, M. J.; Argüelles, M. W.; Goycoolea, V. F.M.; Carvajal, M. E.; López, F. Y.L. 2019. Métodos de preparación de nanopartículas de quitosano: una revisión. *Biocencia*. Vol. 21 (3): 13-25.

Castro, R.D. 2017. Nanotecnología en la agricultura. *Revista Bionatura*. Vol. 2 (3): 48-53.

Chaud, M.; Souto, E. B.; Zielinska, A.; Severino, P.; Batain, F.; Oliveira, J. J.; Alves, T. 2021. Nanopesticides in agriculture: benefits and challenge in agricultural productivity, toxicological risks to human health and environment. *Toxics*. Vol 9: 1-19. <https://doi.org/10.3390/toxics9060131>

Chaudhry, Q.; Scotter, M.; Blackburn, J.; Ross, B.; Boxall, A.; Castle, L.; Aitken, R.; Watkins, R. 2008. Applications and implications of nanotechnologies for the food sector. *Food Additives & Contaminants: Part A*. Vol. 25(3): 241-258.

Chen, M.; Sun, Y.; Liang, J.; Zeng, G.; Li, Z.; Tang, L.; Zhu, Y.; Jiang, D.; Song, B. 2019. Understanding the influence of carbon nanomaterials on microbial communities. *Environ. Int.* Vol. 126: 690-698. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.005>.

Chen, W. Y.; Yermembetova, A.; Washer, B. M.; Jiang, X.; Shuvo, S. N.; Peroulis, D.; Wei, A.; Stanciu, L. 2020. Selective Detection of Ethylene by MoS₂- Carbon Nanotube Networks

Coated with Cu (I)-Pincer Complexes. ACS Sensors. Vol. 5(6): 1699-1706.
<https://doi.org/10.1021/acssensors.0c00344>.

Christiaens, O.; Petek, M.; Smaghe, G.; Taning, C.N.T. 2020. The Use of Nanocarriers to Improve the Efficiency of RNAi-Based Pesticides in Agriculture. Springer, Cham. pp. 49-68. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44873-8_3.

Cota, S. G.; Merlo, S. L.; Ávalos, R. A.; Mendoza, G. N. 2015. Assessment approaches, test methods, and monitoring strategies for nanomaterials. En Nanomaterials in the environment. American Society of Civil Engineers. pp 27-56.

Cushen, M.; Kerry, J.; Morris, M.; Cruz, R. M.; Cummins, E. 2012. Nanotechnologies in the food industry- Recent developments, risks and regulation. Trends in Food Science & Technology. Vol. 24(1): 30-46.

De Ariño, O.A. 2018. Nanotecnología y seguridad alimentaria. Nutrición Hospitalaria. Vol. 35(4): 146-149.

De Smedt, C.; Someus, E.; Spanoghe, P. 2015. Potential and actual uses of zeolites in crop protection. Pest Management Science. Vol 71: 1355-1367.

Delgado, G.C. 2009. Nanotecnología y producción de alimentos: impactos económicos, sociales y ambientales. Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional. Vol. 17 (34), 186-205.

Dreaden, E.C.; Alkilany, A.M.; Huang, X.; Murphy, C.J.; El-Sayed, M.A. 2012. La edad de oro: nanopartículas de oro para biomedicina. Chem. Soc. Rev. Vol 41: 2740–2779.<http://dx.doi.org/10.1039/C1CS15237H>.

- Dutta, G. S.; Agarwal, A.; Pradhan, A. 2018. Phytostimulatory effect of silver nanoparticles (AgNPs) on rice seedling growth: An insight from antioxidative enzyme activities and gene expression patterns. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol 161: 624-633.
- Dzul, E. M.S.; Cauich, D. M.M.; Razo, L. T.A.; Avila, R. M.; Reyes, A. J.A.; González, M. M.P. 2018. Aqueous leaf extracts of *Cnidocolus chayamansa* (Mayan chaya) cultivated in Yucatán México. Part II: Uses for the phytomediated synthesis of silver nanoparticles. *Materials Science & Engineering C*. Vol. 91: 838-852. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.06.007>.
- El Shetehy, M.; Moradi, A.; Maceroni, M.; Reinhardt, D.; Petri-Fink, A.; Rothen, R. B., Mauch, F.; Schwab, F. 2021. Silica nanoparticles enhance disease resistance in *Arabidopsis* plants. *Nature Nanotechnology*. Vol 16: 344-353. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-00812-0>.
- Fenu, G.; Maridina, M. F. 2020. DSS LANDS: Un sistema de apoyo a la toma de decisiones para la agricultura en Cerdeña. *HighTech and Innovation Journal*. Vol. 1(3): 129-135.
- Ferreira, A.J.; Cemlyn, J.J.; Robalo, C.C. 2013. Nanopartículas, nanotecnología y nanotoxicología pulmonar. *Rev. Port. Pneumol*. Vol. 19(1): 28–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rppneu.2012.09.003>.
- Fortis, H. M.; Garcia, D. J.D.; Preciado, R. P.; Trejo, V. R.; Sanchez, E. A.; Fortis, H. J. 2022. Commercial and phytochemical quality in biofortified ‘Orejona’ lettuce with zinc oxide nanoparticles. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. Vol. 50: 1-15.
- Francis, D.V.; Sood, N.; Gokhale, T. 2022. Biogenic CuO and ZnO Nanoparticles as Nanofertilizers for Sustainable Growth of *Amaranthus hybridus*. *Plants*. Vol. 11: 1-21.

- Fundación Española para la Ciencia y la tecnología (FECYT). 2003. Nanociencia y Nanotecnología: Entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro. Ministerio de ciencia e innovación. Madrid España. 1^{er} Ed. 248 p.
- Galindo, G. A. P; Fortis-Hérendez. M.; De La Rosa-Reta, C.V.; Zermeño-González, H. 2022. Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa* seedlings. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol. 13(28): 299-308.
- Ge, Y.; Schimel, J. P.; Holden, P. A. 2011. Evidence for negative effects of TiO₂ and ZnO nanoparticles on soil bacterial communities. Environ. Sci. Tech. Vol 45: 1659-1664. <https://doi.org/10.1021/es103040t>.
- Gohari, G.; Safai, F.; Panahirad, S.; Akbari, A.; Rasouli, F.; Reza, D. M.; Fotopoulos, V. 2020. Modified multiwall carbon nanotubes display either phytotoxic or growth promoting and stress protecting activity in *Ocimum basilicum* L. in a concentration-dependent manner. Chemosphere. Vol. 249: 1-14.
- Grillo, R.; Pereira, S. N.Z.; Rodrigues, M. C.; Henrique, R. A.; De Lima, R.; Fernandes, F. L. 2012. Poly(-caprolactone) nanocapsules as carrier systems for herbicides: Physico-chemical characterization and genotoxicity evaluation. Journal of Hazardous Materials. Vol. 231-232: 1–9.
- Guan, H.; Chi, D.; Yu, J.; Li, X. 2008. A novel photodegradable insecticide: Preparation, characterization and properties evaluation of nano-Imidacloprid. Pesticide Biochemistry and Physiology. Vol 92: 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2008.06.008>.

- Guillen, E. R.R.; Zuñiga, E. L.; Ojeda, B. D.L.; Rivas, G. T.; Trejo, V. R.; Preciado, R. P. 2022. Efecto de la nanobiofortificación con hierro en el rendimiento y compuestos bioactivos en pepino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 28: 173-184.
- Guo, H.; White, J.C.; Wang, Z.; Xing, B. 2018. Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*. Vol 6: 77-83. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.009>.
- Han, M.; Okamoto, M.; Beatty, P. H.; Rothstein, S. J.; Good, A. G. 2015. The genetics of nitrogen use efficiency in crop plants. *Annu. Rev. Genet.* Vol 49: 269-289. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-112414-055037>.
- Hernández, F. M.; Delgado, G. J.D.; Rangel, P. P.; Valencia, T. R.; Estrada, S. A.; Hernandez, F. J. 2022. Commercial and phytochemical quality in biofortified ‘Orejona’ lettuce with zinc oxide nanoparticles. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. Vol. 50(4): 15 pp.
- Hernández, P. R.; Olarte, P. A.; Salgado, D. R.; Salgado, D. A.M.; Salomé, M. A.; Martínez, C. F.R. 2023. Manejo de la cascarilla de arroz como residuo postcosecha y su conversión en nanocelulosa. *Mundo Nano*. Vol. 16(30): 1e-17e.
- Hilty, F. M.; Knijnenburg, J. T. N.; Teleki, A.; Krumeich, F.; Hurrell, R. F.; Pratsinis, S. E.; Zimmermann, M. B. 2011. Incorporation of Mg and Ca into Nanostructured Fe₂O₃ Improves Fe Solubility in Dilute Acid and Sensory Characteristics in Foods. *Journal of Food Science*. Vol. 76(1): N2-N10.
- Hisatomi, T.; Kubota, J.; Domen, K. 2014. Avances recientes en semiconductores para la separación fotocatalítica y fotoelectroquímica del agua. *Chem. Soc. Rev.* Vol 43: 75202-7535. [http:// dx.doi.org/10.1039/C3CS60378D](http://dx.doi.org/10.1039/C3CS60378D).

- Huang, J.; Li, Q.; Sun, D.; Lu, Y.; Su, Y.; Yang, X.; Wang, H.; Wang, Y.; Shao, W.; He, N.; Hong, J.; Chen, C. 2007. Biosíntesis de nanopartículas de plata y oro mediante una nueva hoja de *Cinnamomum camphora* secada al sol. *Nanotecnología*. Vol. 18(10): 11pp.
- Hong, C.; Ye, S.; Dai, C.; Wu, C.; Chen, L.; Huang, Z. 2020. Sensitive and on-site detection of glyphosate based on papain-stabilized fluorescent gold nanoclusters. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. pp. 1-8.
- Ibrahim, K.S. 2013. Nanotubos de carbono: propiedades y aplicaciones: Una reseña. *Carbon Lett*. Vol 14: 131–144. <http://dx.doi.org/10.5714/CL.2013.14.3.131>.
- Jampílek, J., Kráľová, K. (2017). Nanopesticides: preparation, targeting, and controlled release. *New pesticides and soil sensors*. pp 81-127. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804299-1.00004-7>.
- Jo, Y. K.; Kim, B. H.; Jung, G. 2009. Antifungal Activity of Silver Ions and Nanoparticles on Phytopathogenic Fungi. *Plant Disease*. Vol. 93: 1037-1043.
- Joško, I.; Oleszczuk, P.; Dobrzyńska, J.; Futa, B.; Joniec, J.; Dobrowolski, R. 2019. Long-term effect of ZnO and CuO nanoparticles on soil microbial community in different types of soil. *Geoderma*. Vol 352: 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.010>.
- Kah, M.; Beulke, S.; Tiede, K.; Hofmann T. 2012. Nanopesticides: State of Knowledge, Environmental Fate, and Exposure Modeling. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. Vol. 43(16): 1823- 1867.

- Kah, M.; Beulke, S.; Tiede, K.; Hofmann, T. 2013. Nanopesticides: state of knowledge, environmental fate, and exposure modeling. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* Vol 16: 1823-1867. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.671750>.
- Kah, M.; Johnston, L. J.; Kookana, R. S.; Bruce, W.; Haase, A.; Ritz, V.; Dinglasan, J.; Doak, S.; Garelick, H.; Gubala, V. 2021. Comprehensive framework for human health risk assessment of nanopesticides. *Nat. Nanotechnol.* Vol 16: 955-964. <https://doi.org/10.1038/s41565-021-00964-7>.
- Kah, M.; Kookana, R. S.; Gogos, A.; Bucheli, T. D. 2018. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nat. Nanotechnol.* Vol 13: 677-684. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1>.
- Kim, M.J.; Ko, D.; Ko, K.; Kim, D.; Lee, J.Y.; Woo, S. M.; Kim, W.; Chung, H. 2018. Effects of silver-graphene oxide nanocomposites on soil microbial communities. *Journal of Hazardous Materials* Vol. 346: 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.032>.
- Kottegoda, N.; Munaweera, I.; Madusanka, N.; Karunaratne, V. 2011. A green slow-release fertilizer composition based on urea-modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood. *Curr. Sci.* pp. 73-78. <http://www.jstor.org/stable/24077865>.
- Kumar, R. S.; Shiny, P.; Anjali, C.; Jerobin, J.; Goshen, K. M.; Magdassi, S.; Mukherjee, A.; Chandrasekaran, N. 2013. Distinctive effects of nano-sized permethrin in the environment. *Environ. Sci. Pollut. Res.* Vol 20: 2593-2602. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1161-0>.

- Kumar, N. and Meesala, S. R. 2025. Nanofertilizers in maize (*Zea mays* L.): Enhancing nutrient efficiency and sustainability International Journal of Research in Agronomy 2025; 8(4): 98-102. DOI: <https://www.doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i4b.2747>.
- Kundu, K. A.; Chabra, V. 2023. Efecto de la aplicación de nanourea en el crecimiento y el rendimiento del maíz (variedad C-1415) en las condiciones de Punjab. Eco. Medioambiente y Cons. Vol. 29 (4): 1604-1607.
- Ledezma, A.; Romero, J.; Hernández, M.; Moggio, I.; Arias, E.; Padrón, G.; Orozco, V.; Martínez, A.; Martínez, C.; Torres, S. 2014. Síntesis biomimética de nanopartículas de plata utilizando extracto acuoso de nopal (*Opuntia* sp.) y su electrohilado polimérico. Superficies y Vacío. Vol. 27(4): 133-140.
- Lira, S. R. H.; Méndez, A. B.; De Los Santos, V. G.; Vera, R. LI. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. ACTA UNIVERSITARIA Multidisciplinary Scientific Journal. Vol 28 (2): 9-24. doi: 10.15174/au.2018.1575
- Liu, R.; Lal, R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. Scientific Total Environ. Vol 514: 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104>.
- Liu, Y.; Yan, L.; Heiden, P. Lask, P. 2001. Use of Nanoparticles for Controlled Release of Biocides in Solid Wood. Journal of Applied Polymer Science. Vol. 79: 458–465.
- Maghsoodi, M. R.; Najafi, N.; Reyhanitabar, A.; Oustan, S. 2020. Hydroxyapatite nanorods, hydrochar, biochar, and zeolite for controlled-release urea fertilizers. Geoderma. Vol 379: 114644. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114644>.

- Mahajan, P.; Dhoke, S.; Khanna, A. 2011. Effect of nano-ZnO particle suspension on growth of mung (*Vigna radiata*) and gram (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method. *J. Nanotechnol.* Vol 2011: 1-8. <https://doi.org/10.1155/2011/696535>.
- Mahmoodzadeh, H.; Nabavi, M.; Kashefi, H. 2013. Effect of Nanoscale Titanium Dioxide Particles on the Germination and Growth of Canola (*Brassica napus*). *Journal of Ornamental and Horticultural Plants.* Vol 3(1): 25-32.
- Mansha, M.; Khan, I.; Ullah, N.; Qurashi, A. 2017. Synthesis, characterization and visible-light-driven photoelectrochemical hydrogen evolution reaction of carbazole-containing conjugated polymers. *ScienceDirect.* Vol 42(16): 10952-1961. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.053>.
- Mendoza, U. G.; Rodríguez, L. J. L. 2007. La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. *Perfiles latinoamericanos.* Vol 14 (29): 161-186.
- Mohammed, A.E. 2015. Green synthesis, antimicrobial and cytotoxic effects of silver nanoparticles mediated by *Eucalyptus camaldulensis* leaf extract. *Asian Pac. J. Trop. Biomed.* Vol. 5(5), 382–386. doi:10.1016/s2221-1691(15)30373-7
- Molina, F. V. 2016. *Soil colloids: properties and ion binding.* CRC Press. 1° Edición. <https://doi.org/10.1201/b15349>.
- Molina, G. A.; López, M. J.L.; González, R. M.; Esparza, R.; Estevez, M. 2023. Desarrollo y evaluación de un sensor portátil para la detección de Hg²⁺, a través de la síntesis verde de AuNP utilizando extracto acuoso de *Sargassum* spp. *Mundo Nano.* Vol. 16(31): 1e-17e.

- Moll, J.; Klingenfuss, F.; Widmer, F.; Gogos, A.; Bucheli, T. D.; Hartmann, M.; Van der Heijden, M. G.A. 2017. Effects of titanium dioxide nanoparticles on soil microbial communities and wheat biomass. *Soil Biology & Biochemistry*. Vol. 111: 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.019>.
- Moreau, D.; Bardgett, R. D.; Finlay, R. D.; Jones, D. L.; Philippot, L. 2019. A plant perspective on nitrogen cycling in the rhizosphere. *Functional Ecology*. Vol 33: 540-552. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13303>.
- Muhammad, D. H.M.; Abbas, A.; Ahmad, R. 2022. Fascinating Role of Silicon Nanoparticles to Mitigate Adverse Effects of Salinity in Fruit trees: a Mechanistic Approach. *Silicon*. 14: 8319–8326. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01604-4>.
- Nair, R.; Varghese, S. H.; Nair, B. G.; Maekawa, T.; Yoshida. Y.; Kumar, D. S. 2010. Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*. Vol. 179: 154-163.
- Narvaez, Z.J.A.; Sanchez, T.L.F. 2009. Agave as a raw material: Recent technologies and applications. *Recent Patents on Biotechnology*. Vol. 3(1):185-191.
- Naseem, T.; Akhyar, F.M.; 2015. Antibacterial activity of green synthesis of iron nanoparticles using *Lawsonia inermis* and *Gardenia jasminoides* leaves extract. *Journal of Chemistry*. 1–7.
- Nastulyavichus, A.; Kudryashov, S.; Smirnov, N.; Saraeva, I.; Rudenko, A.; Tolordava, E.; Lonin, A.; Romanova, Y.; Zayarny, D. 2018. Antibacterial coatings of Se and Si nanoparticles. *Applied Surface Science*, 18 pp.

- Navarro, E.; Piccapietra, F.; Wagner, B.; Marconi, F.; Kaegi, R.; Odzak, N.; Sigg, L.; Behra, R.; 2008. Toxicidad de las nanopartículas de plata para *Clamidia reinhardtii*. Environmental Science & Technology. Vol. 42: 8959–8964. <http://dx.doi.org/10.1021/es801785m>.
- Núñez, A. E. 2011. Didáctica de la lectura eficiente. UAEM.
- Ojeda, G. A.; Arias, G. A. M.; Sgroppo, S. C. 2019. La nanotecnología y su aplicación en alimentos. Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria: En Nanociencias y Nanotecnología. Vol. 12(23): e1e14.
- Pardo, L.; Arias, J.; Molleda, P. 2022. Elaboración de nanopartículas de plata sintetizadas a partir de extracto de hojas de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) y su uso como conservante. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 35(1):45-58. <http://doi.org/10.17163/lgr.n35.2022.04>.
- Pasquoto, S. T.; Guilger, C. M.; Campos, V.R. E.; Germano, C. T.; Bilesky, J. N.; Migliorini, B. B.; Feitosa, L. O.; Sousa, B. T.; De Oliveira, H. C.; Fraceto, L. F.; Lima, R. 2023. Titanium biogenic nanoparticles to help the growth of *Trichoderma harzianum* to be used in biological control. Journal of Nanobiotechnology. Vol. 21: 1-21.
- Pérez, L. F.; López, V. E.R.; Ortega, O. H.; Cadenas, P. G.; Benavides, M. A.; Juárez, M. A. 2019. Responses of Tomato Plants under Saline Stress to Foliar Application of Copper Nanoparticles. Plants, 8(6): 1-17. <https://doi.org/10.3390/plants8060151>.
- Pérez, V. A.; Leyva, T. D.A.; Gómez, M. F.C. 2018. Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050. Revista mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol. 9(1): 1-19.

Peters, R.; Brandhoff, P.; Weigel, S.; Marvin, H.; Bouwmeester, H.; Aschberger, K.; Rauscher, H.; Amenta, V.; Arena, M.; Botelho, M.; Gottardo, S.; Mech, A. 2014. Inventario de aplicaciones de la Nanotecnología en el sector agrícola, alimentario y de piensos. Publicaciones de apoyo de la EFSA, 125 pp.

Ponce, R.C.E.; Chanona, P.J.J.; Garibay, F.V.; Palacios, G.E.; Karamath, J.; Terrés, R.E.; Calderón, D.G. 2014. Preparación de nanopartículas de celulosa a partir de desechos de agave y su caracterización morfológica y estructural. Rev. Mex. Ing. Quím. Vol. 13 (3): 897–906.

Priyanshi, Husain, K.; Siddiqui, MZ.; Singh, V.; Neelam,; Sahu, S.; and Singh A. 2025. Effect of nano fertilizer on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). DOI: <https://www.doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i4i.2846>.

Pratama, A. A.; Terpstra, J.; De Oliveria, A. L. M.; Salles, J. F. 2020. The role of rhizosphere bacteriophages in plant health. Trends Microbiol., 28: 709-718. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.04.005>.

Puiso, J.; Macionene, I.; Jonkuvienė, D.; Salomskienė, J. 2014. Antimicrobial activity of silver nanoparticles synthesized using plant extracts. Vet. Med. Zootekh. Vol. 65 (87): 61–67.

Qu, Q.; Zhang, Z.; Peijnenburg, W. J. G.M.; Liu, W.; Lu, T.; Hu, B. Chen, J.; Chen, J.; Lin, Z.; Qian, H. 2020. Rhizosphere microbiome assembly and its impact on plant growth. Journal of Agricultural and Food Chemistry. Vol 68: 5024-5038. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00073>.

- Ranjan, A.; Rajput, V. D.; Minkina, T.; Bauer, T.; Chauhan, A.; Jindal, T. 2021. Nanoparticles induced stress and toxicity in plants. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. Vol. 15: 1-11.
- Rocha-Santillano J.J.; Sangerman-Jarquín, D.Ma.; Preciado-Rangel.P.; De la O-Olán, M.; Fortis-Hernández, M.; Marquez-Guerrero, S.Y. Eduardo A. Flores-Hernandez, E.A.; Romero-Arenas, O. 2024. Impacto de nanopartículas de hidroxapatita en los compuestos bioactivos y actividad enzimática en pimiento morrón. *Rev.Fitotec.Mex.Vol.47(49:369-375*.
- Rao, J. P.; Geckeler, K. E. 2011. Nanopartículas de polímero: preparación Técnicas y parámetros de control de tamaño. *Prog. Polym. Sci.* Vol 36: 887–913. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.01.001>.
- Rawat, M.K.; Jain, A.; Singh, S.; Mehnert, W.; Thunemann, A. F.; Souto, E. B.; Mehta, A.; Vyas, S. P. 2011. Estudios sobre nanopartículas lipídicas sólidas de repaglinida basadas en matrices lipídicas binarias: evaluación in vitro e in vivo. *J. Pharm. Sci.* Vol 100: 2366-2378. <http://dx.doi.org/10.1002/jps.22435>.
- Rawat, K. A.; Maji, S.; Razauddin, M.; Maurya, K. A.; Meena, C. R. 2022. Effect of fertilizers, vermicompost and farmyard manure on growth of red dragon fruit (*Hylocereus costaricensis*). *AGBIR*. Vol 38: 332- 335
- Rippner, D. A.; Green, P. G.; Young, T. M.; Parikh, S. J. 2018. Dissolved organic matter reduces CuO nanoparticle toxicity to duckweed in simulated natural systems. *Environmental Pollution*. Vol. 234: 692-698. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.014>.

- Rodríguez, F. F.; Lopez, C. A.G.; Moreno, V. M.J.; Graciano, V. A.Z.; Quintero, R. I.E.; Del Toro, S. C.L.; Tapia, H. J.A. 2021. Sustainable-green synthesis of silver nanoparticles using safflower (*Carthamus tinctorius L.*) waste extract and its antibacterial Activity. *Heliyon*. Vol. 7: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06923>.
- Roy, K.; Sarkar, C.K.; Ghosh, C.K. 2015. Single-step novel biosynthesis of silver nanoparticles using *Cucumis sativus* fruit extract and study of its photocatalytic and antibacterial activity. *Dig. J. Nanomater. Biostruct.* Vol. 10 (1): 107–115.
- Sharma, N.; Singhvi, R. 2017. Effects of chemical fertilizers and pesticides on human health and environment: a review. *Int. J. Agr. Environ. Biotech.* Vol 10: 675-680. <https://doi.org/10.5958/2230-732X.2017.00083.3>
- Sharma, P.; Sharma, A.; Sharma, M.; Bhalla, N.; Estrela, P.; Jain, A.; Thakur, P.; Thakur, A. 2017. Nanomaterial Fungicides: In Vitro and In Vivo Antimycotic Activity of Cobalt and Nickel Nanoferrites on Phytopathogenic Fungi. *Global Challenges*. 1700041: 1 – 7.
- Shin, W.K.; Cho, J.; Kannan, A.G.; Lee, Y. S.; Kim, D. W. 2016. Cross-linked composite gel polymer electrolyte using mesoporous methacrylate-functionalized SiO₂ nanoparticles for lithium-ion polymer batteries. *Scientific Reports*. Vol 6: 1-10. <http://dx.doi.org/10.1038/srep26332>.
- Sigmund, W.; Yuh, J.; Park, H.; Maneeratana, V.; Pyrgiotakis, G.; Daga, A.; Taylor, J.; Nino, J.C. 2006. Relaciones de procesamiento y estructura en el electrohilado de sistemas de fibra cerámica. *J. Am. Ceram. Soc.* Vol 89: 395–407. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00807.x>.

- Silva de Hoyos, L.E.; Sánchez, M.V.; Rico, M.A.; Vilchis, N.A.R.; Camacho, L.M.A.; Avalos, B.M. 2012. Silver nanoparticles biosynthesized using *Opuntia ficus aqueus* extract. *Superficies y Vacío*. Vol. 25(1): 31–35.
- Singla, P.; Mehta, R.; Upadhyay, S.N. 2012. Clay Modification by the Use of Organic Cations. *Green and Sustainable Chemistry*. Vol. 2(01): 21–25.
- Singh, R.; Maji, S.; Razauddin, M.; Meena, C. R. 2022. Response of Dragon Fruit [*Hylocereus costaricensis*] on Combine use of Chemical and Organic Nutrition Managements. *Indian Journal of Natural Sciences*. Vol. 13: 48746- 48750
- Sun, W.; Dou, F.; Li, C.; Ma, X.; Ma, L. Q. 2021. Impacts of metallic nanoparticles and transformed products on soil health. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. Vol 51: 973-1002. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1740546>.
- Téllez, J. D.G.; Flores, L. N.S.; Cervantes, C. J.A.; Hernández, M. A.R. 2021. Antibacterial and antifungal activities of encapsulated Au and Ag nanoparticles synthesized using *Argemone mexicana* L extract, against antibiotic-resistant bacteria and *Candida albicans*. *Surfaces and Interfaces*. Vol. 27.
- Thakur, B. K.; Kumar, A.; Kumar, D. 2019. Green synthesis of titanium dioxide nanoparticles using *Azadirachta indica* leaf extract and evaluation of their antibacterial activity. *South African Journal of Botany*. Vol. 124 (1): 223-227.
- Thomas, S.; Harshita, B. S.P.; Mishra, P.; Talegaonkar, S. 2015. Nanopartículas cerámicas: métodos de fabricación y aplicaciones en la administración de fármacos. *Curr. Pharm. Des.* Vol 21: 6165–6188. <http://dx.doi.org/10.2174/1381612821666151027153246>.

- Torres, V. N.; Miranda, A. M.; Ríos, C. A.M.; López, G. V.; López, V. F. 2021. Las malezas como un campo de oportunidades en el estudio de la síntesis verde. *Frontera Biotecnológica*. Vol 18: 4-8.
- Tümay, S.O.; Senocak, A.; Sari, E.; Sanko, V.; Durmus, M.; Demirbas, E. 2021. A new perspective for electrochemical determination of parathion and chlorantraniliprole pesticides via carbon nanotube-based thiophene-ferrocene appended hybrid nanosensor. *Sensors and Actuators: B. Chemical*. Vol. 345: 1-14.
- Vaca, T. D.; Santana, C. A.; Guerra, G. R.; Flores, M. J.L.; López, B. J.S.; Reyes, C. H.; Vázquez, F. S. 2023. Nanomaterial híbrido como bio-fungicida para el sector agrícola. *Mundo Nano*. Vol. 16(30): 1-22.
- Vance, M.E.; Kuiken, T.; Vejerano, E.P.; McGinnis, S.P.; Hochella, M.F.; Rejeski, D.; Hull M.S. 2015. Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. *Beilstein Journal of Nanotechnol*. Vol. 6: 1769-1780.
- Vasilievna, K.O. y Ortiz, M.U. 2002. La estructura del fullereno C60 y sus aplicaciones. *Ciencia UANL*. Vol. 5(4): 475 - 479.
- Velusamy, P.; Das, J.; Pachaiappan, R.; Vaseeharan, B.; Pandian, K. 2015. Greener approach for synthesis of antibacterial silver nanoparticles using aqueous solution of neem gun (*Azadirachta indica*). *Ind. Crops Prod*. Vol. 66(1): 103–109.
- Villanueva, I.M.; Yañez, C. M.G.; Álvarez, G.R.; Hernández, P. M.A.; Flores, G. M.A. 2015. Aqueous corn Husk extract –mediated Green synthesis of AgCl and Ag nanoparticles. *Materials Letters*.

- Yang, Y.; EN Waterhouse, G.; Chen, Y.; Sun, W. D.; Li, D. 2022. Microbial-enabled green biosynthesis of nanomaterials: current status and future prospects. *Biotechnology Advances*. Vol 55: 107914. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107914>.
- Yoon, H. Y.; Lee, J. G.; Esposti, L. D.; lafisco, M.; Kim, P. J.; Shin, S. G.; Jeon, J. R.; Adamiano, A. 2020. Synergistic Release of Crop Nutrients and Stimulants from Hydroxyapatite Nanoparticles Functionalized with Humic Substances: Toward a Multifunctional Nanofertilizer. *ACS Omega*. Vol. 5: 6598-6610.
- Yfran, E. M.M.; Chabbal, M. M.D.; Píccoli, D. A.B.; Giménez, L.I. 2024. Incidencia de las nanopartículas de calcio y magnesio sobre la productividad del limón Eureka. *Cultivos Tropicales*, Vol. 45 (3): 1-8.
- Zanella, Rodolfo. 2012. Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo Nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 5(1): 69-81.
- Zhou, Q.; Zhang, X.; Wu, Z. 2020. Impact of TiO₂ and ZnO nanoparticles on soil bacteria and the enantioselective transformation of racemic-metalaxyl in agricultural soil with *Lolium perenne*: A wild greenhouse cultivation. *J. Agr. Food Chem*. Vol. 68: 11242-11252. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c03959>.
- Zulfiqar, F.; Navarro, M.; Ashraf, M.; Akram, N.A.; Munné, B.S. 2019. Nanofertilizer use for sustainable agriculture: advantages and limitations. *Plant Sci*. Vol. 289: 110-270.