

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN AGROPECUARIA



Funcionalización de nanopartículas óxido-metálicas mediada por metabolitos vegetales
y su aplicación en la agricultura

Por:

FERNANDO DANIEL SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ADMINISTRADOR

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN AGROPECUARIA

Funcionalización de nanopartículas óxido-metálicas mediada por metabolitos vegetales
y su aplicación en la agricultura

Por: **Fernando Daniel Sánchez Hernández**

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ADMINISTRADOR

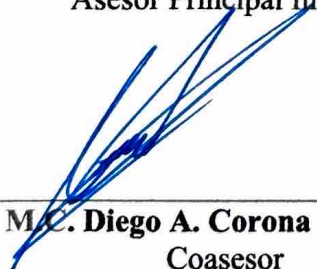
Aprobada por el Comité de asesoría



Dr. Julio César Tafolla Arellano
Asesor Principal Interno



Dra. Cecilia Castro López
Asesora Principal Externa



M.C. Diego A. Corona Martínez
Coasesor



Dra. Lydia V. Gutiérrez López
Coasesora

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIOECONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN AGROPECUARIA

Funcionalización de nanopartículas óxido-metálicas mediada por metabolitos vegetales
y su aplicación en la agricultura

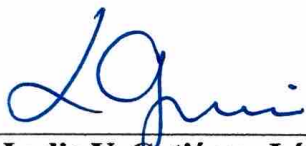
Por: **Fernando Daniel Sánchez Hernández**

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ADMINISTRADOR

Aprobada por el Jurado examinador



Dra. Lydia V. Gutiérrez López
Presidenta



Dr. Julio César Tafolla Arellano
Vocal



Dra. Cecilia Castro López
Vocal



M.C. Diego A. Corona Martínez
Vocal suplente



Lic. Norma E. Sánchez García
Coordinadora de la División de Ciencias Socioeconómicas



Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

DERECHO DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo, tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior, me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Atentamente

Alma Terra Matter



Fernando Daniel Sánchez Hernández
Autor principal

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por haberme acompañado en este trayecto y vivencias dentro de la universidad, así mismo a **Don Antonio Narro** por su legado y a toda la **UAAAN**, hablando en general desde la escuela hasta los maestros, compañeros y amigos que tuve el placer de conocer en este camino.

A **mi familia** que siempre estuvo presente en cada etapa de este viaje.

A **mis padres**, que por ellos soy quien soy, y también gracias a ellos soy orgullosamente un buitre de la Narro, en donde todo empezó de muy niño escuchando las historias vividas por ellos en esta hermosa universidad.

A **mis hermanos Luis y Diana**, por apoyarme en esta etapa y a su vez tener más cercanía y vivencias juntos, porque al estudiar aquí eso hacía que no se sintiera la distancia de la casa. Especialmente a mi hermana, porque proporcionó el sistema de audio (audífonos) para realizar esta monografía. Así como a la agrupación peruana Corazón Serrano, porque fueron la fuente de inspiración y concentración al momento de escribir por las noches.

A todas las personas que tuve el placer de conocer y convivir dentro y fuera de la universidad como algunos maestros que también se hicieron amigos, como lo son el **Dr. Julio Cesar Tafolla**, **M.C. Rolando Segoviano**, **M.C. Bernardo Rincón** y **Lic. Armando**. Así mismo, a todos dentro del **Laboratorio de Biotecnología y Biología Molecular**, donde a final de cuantas éramos como familia, a la **Dra. Cecilia Castro** y **M.C. Miguel García** con quienes conviví más gracias a este trabajo.

A la **Rondalla Universitaria** de la **UAAAN Saltillo**, porque allí fue donde conocí grandes personas, entre ellas **Horacio Ramos** y **Carlos Andrés**, que al finas nos hicimos como hermanos, por las vivencias dentro de la rondalla, en donde cada rasgueo en la guitarra no solo era sonido o una simple canción, eran momentos de alegría y convivencia, pero al igual en algunos momentos de molestia, pero que se pasaban y seguíamos igual dentro de la rondalla. Fue un enorme honor el haber sido director de la rondalla.

A los **amigos** que la Narro me presentó y que estuvieron conmigo en las diferentes etapas como lo fueron **Horacio**, **Carlos** (Chipilín), **Montserrat Salguero**, **Jhoselyn Chio Ancona**, **Diana Aguirre** y **Christian Michaca**.

A mis **amigos** de mi lugar de procedencia, **Vivian, David, Beto, Yuvi, Seve, Alex, Denis, Dana y Brenda**, que siempre estuvieron conmigo a la distancia.

A **mi Grupo Adictivo L.S.D.** que surgió gracias a querernos superar para solventar gastos de la escuela, a todos los músicos que también son Buitres y estuvieron con nosotros **Héctor, Abimael, Emiliano (Taco), Ángel**, mi hermano **Luis, Beto y Carlos (Cuasi)**.

DEDICATORIA

A **mis padres, hermanos, familiares, amigos y maestros** que siempre me apoyaron, me dieron consejos e hicieron ver que todo se puede, nada es imposible en esta vida, los límites te los pones tú, y este logro no solo es mío, sino también suyo.

Gracias por todo **UAAAN**, siempre serás mi segunda casa.

ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIA	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN	XI
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Nanopartículas de óxidos metálicos.....	3
2.1.1 Generalidades.....	3
2.1.2 Propiedades fisicoquímicas.....	4
2.1.3 Métodos de síntesis.....	5
2.1.4 Técnicas de caracterización.....	6
2.2 Metabolismo vegetal.....	7
2.2.1 Metabolitos secundarios.....	8
2.2.2 Diversidad química.....	8
2.2.3 Métodos de extracción.....	9
2.2.4 Actividades biológicas.....	10
2.3 Funcionalización de nanopartículas.....	12
2.3.1 Interacción óxido metálico-metabolito secundario.....	12
2.3.2 Métodos de funcionalización.....	12
2.3.2.1 Modificación <i>in situ</i>	13
2.3.2.2 Modificación <i>post-síntesis</i>	14
2.3.3 Efecto en propiedades fisicoquímicas.....	14
2.4 Potencial agrícola de nanopartículas funcionalizadas.....	15
2.4.1 Prevención y control de plagas.....	15
2.4.2 Prevención y control de enfermedades.....	16
2.4.3 Inducción de resistencia a estrés abiótico.....	17

2.4.4 Estimulación del crecimiento vegetal.....	18
III. CONCLUSIONES.....	19
IV. LITERATURA CITADA.....	20

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Tamaño y morfología de NPs de óxidos metálicos.....	4
Figura 2. Tipos de metabolismo vegetal.....	7
Figura 3. Principales actividades biológicas de los metabolitos secundarios.....	11
Figura 4. Métodos de funcionalización de NPs de óxidos metálicos.....	13

RESUMEN

La nanotecnología ha emergido como una alternativa prometedora para enfrentar los desafíos asociados a una producción agrícola sostenible. Particularmente, las nanopartículas (NPs) de óxidos metálicos han despertado un creciente interés debido a sus propiedades fisicoquímicas y capacidad de interacción con sistemas biológicos. Sin embargo, su eficacia puede potenciarse mediante métodos de funcionalización superficial. Entre las estrategias exploradas recientemente destaca el uso de metabolitos secundarios de origen vegetal, caracterizados por su amplia diversidad química y múltiples actividades biológicas. Éstos pueden interactuar con la superficie de las NPs, modificando sus características y favoreciendo la obtención de materiales con funcionalidades mejoradas. Así, las NPs pueden presentar un mayor potencial para aplicaciones agrícolas relacionadas con la nutrición vegetal, protección fitosanitaria, tolerancia al estrés, entre otras. En este sentido, el objetivo de la presente monografía fue analizar el estado actual del conocimiento sobre la funcionalización de nanopartículas (NPs) de óxidos metálicos mediada por metabolitos vegetales, con énfasis en los métodos de funcionalización, mecanismos de interacción NPs–metabolito, impacto sobre sus propiedades fisicoquímicas y aplicaciones potenciales en la agricultura.

Palabras clave: Óxido metálico, metabolito secundario, nanotecnología, sistema agrícola.

I. INTRODUCCIÓN

Incrementar la productividad agrícola de manera sostenible constituye uno de los principales retos de la agricultura moderna. El aumento en la demanda de alimentos, sobreexplotación de recursos naturales, cambio climático y uso excesivo de agroquímicos han impulsado el desarrollo de nuevas estrategias que permitan mejorar la productividad de los cultivos y reducir el impacto ambiental de las actividades agrícolas (Khatri *et al.*, 2024). Entre las tecnologías con potencial para contribuir a este objetivo se encuentra la nanotecnología, ciencia dedicada al diseño, producción y caracterización de materiales con dimensiones en la escala nanométrica (Raut *et al.*, 2026).

Dentro de los nanomateriales con mayor interés se encuentran las nanopartículas (NPs) de óxidos metálicos (*e.g.*, CuO, Fe₃O₄, AgO y ZnO), las cuales poseen propiedades fisicoquímicas que favorecen su aplicación en el sector agrícola (Kaningini *et al.*, 2022). En particular, se ha demostrado su potencial para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, contribuir al control de plagas y enfermedades, promover el crecimiento vegetal y asistir en la remediación ambiental (Sen *et al.*, 2025). Sin embargo, la eficacia de las NPs está determinada por sus características superficiales, las cuales pueden modificarse para potenciar su actividad a través de diferentes métodos de funcionalización (Cartwright *et al.*, 2020).

La funcionalización de NPs consiste en la incorporación de moléculas capaces de alterar sus características superficiales y conferirles propiedades específicas. En este sentido, los metabolitos secundarios producidos por las plantas han adquirido especial relevancia debido a su diversidad química y actividades biológicas (Lin *et al.*, 2024). Compuestos como alcaloides, flavonoides y terpenos poseen grupos funcionales capaces de interactuar con las NPs, modificando propiedades como el tamaño, carga superficial, dispersión y reactividad. Estos cambios pueden influir directamente en la disponibilidad y respuesta biológica de las NPs (Sanità *et al.*, 2020).

Aunque los avances en este campo evidencian resultados prometedores para diversas aplicaciones agrícolas, la información disponible aborda aspectos específicos de las NPs de manera aislada, lo que limita una comprensión integral de las interacciones que ocurren en el sistema NPs–metabolito, así como de los factores que influyen en su diseño y actividad. Por ello, re-

sulta necesario analizar e integrar el conocimiento generado para comprender el papel de la funcionalización con metabolitos vegetales en el desarrollo de NPs con propiedades enfocadas a las necesidades de una agricultura más sostenible.

1.1 Objetivo general

Analizar el estado actual del conocimiento sobre la funcionalización de nanopartículas (NPs) de óxidos metálicos mediada por metabolitos vegetales, con énfasis en los métodos de funcionalización, mecanismos de interacción NPs–metabolito, impacto sobre sus propiedades físico-químicas y aplicaciones potenciales en la agricultura.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Nanopartículas de óxidos metálicos

2.1.1 Generalidades

Los átomos metálicos reaccionan con oxígeno bajo diversas condiciones fisicoquímicas para formar óxidos metálicos, compuestos que han adquirido gran relevancia en el área de la nanotecnología. En este contexto, las nanopartículas (NPs) de óxidos metálicos son una clase de materiales inorgánicos cuyo tamaño oscila entre 1–100 nm. Se caracterizan por presentar una elevada relación de superficie–volumen, alta reactividad química, estabilidad estructural y capacidad de interacción con sistemas biológicos (Muthukrishnan *et al.*, 2025).

Entre los óxidos metálicos más utilizados para la síntesis de NPs se encuentran el óxido de cerio (CeO_2), óxido de cobre (CuO), óxido de hierro (Fe_3O_4 y Fe_2O_3), óxido de magnesio (MgO), óxido de níquel (NiO), óxido de plata (AgO), óxido de titanio (TiO_2) y óxido de zinc (ZnO), cada uno con características particulares que influyen en su comportamiento y funcionalidad (Negrescu *et al.*, 2022). Así, estas NPs pueden exhibir propiedades fisicoquímicas, eléctricas, ópticas y catalíticas únicas o superiores a las observadas en materiales de la misma composición a escala macroscópica. Dichas propiedades están determinadas por varios factores, entre ellos el tamaño de partícula, morfología, estructura cristalina, carga superficial y grado de agregación (Muthukrishnan *et al.*, 2025).

Las NPs de óxidos metálicos se clasifican con base en dos criterios: su composición química y dimensionalidad. De acuerdo con su composición, se distinguen las NPs simples, formadas por un único metal combinado con oxígeno (*e.g.*, AgO y ZnO), y las NPs mixtas, compuestas por dos o más elementos metálicos dentro de misma estructura (*e.g.*, NiFe_2O_4), lo que permite modificar y optimizar sus propiedades (Alhalili, 2023). Por otro lado, en función de su dimensionalidad, las NPs se agrupan en cuatro categorías: i) cero-dimensionales (0-D), en las que las tres dimensiones se encuentran dentro de la nano-escala; ii) unidimensionales (1-D), que presentan una dimensión fuera de la nano-escala; iii) bidimensionales (2-D), caracterizadas por tener dos dimensiones fuera de la nano-escala; y iv) tridimensionales (3-D), cuyas dimensiones no encuentran restringidas a la nano-escala (Joudeh & Linke, 2022).

2.1.2 Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas de las NPs son determinantes en su comportamiento e interacción con otros sistemas. Son estructuras coloidales sólidas que presentan al menos una dimensión menor a 100 nm. Aunque no poseen una forma específica, pueden encontrarse en diversas morfologías, incluyendo esféricas, cúbicas, triangulares, hexagonales, prismáticas, alargadas, en forma de placa o ensamblajes más complejos (**Figura 1**). Cabe destacar que la morfología final depende la naturaleza del material precursor, método de síntesis y condiciones de crecimiento cristalino (Schiopu *et al.*, 2024).

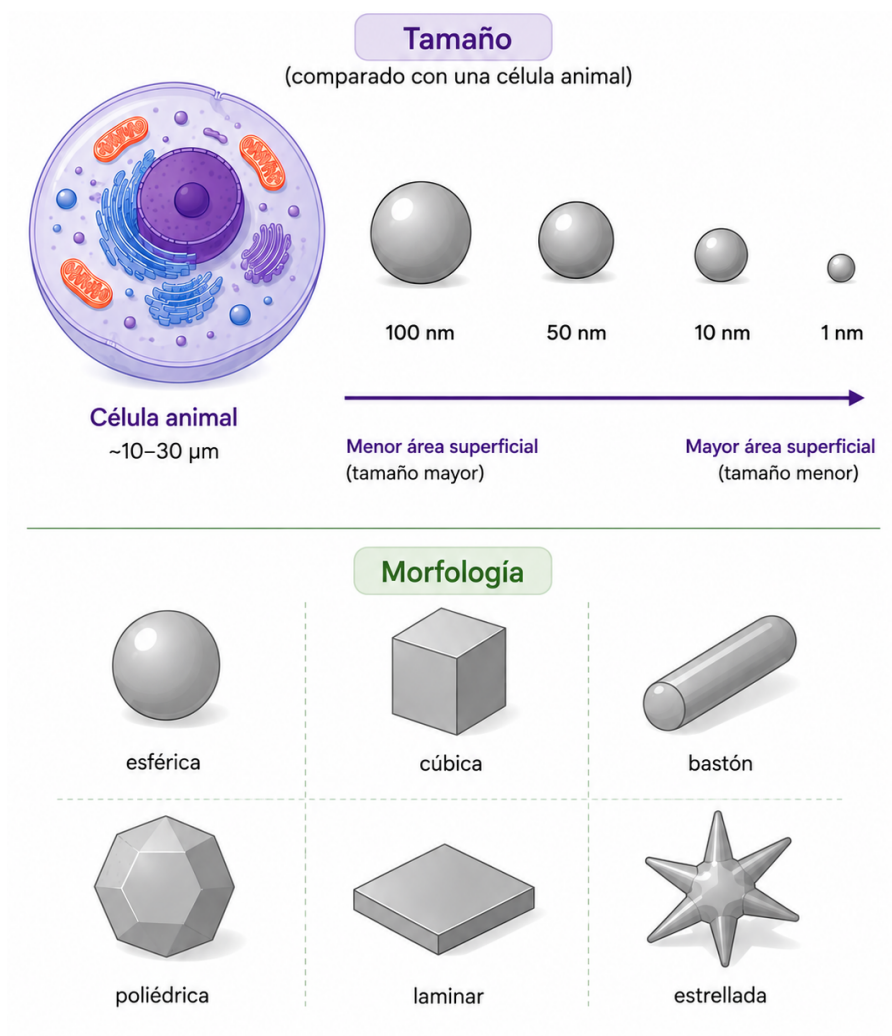


Figura 1. Tamaño y morfología de NPs de óxidos metálicos. Creado con Biorender.com.

Por otro lado, las NPs están constituidas por un núcleo y una capa externa o superficial, cuyos átomos se organizan en arreglos tridimensionales ordenados. En ellas, los aniones de oxígeno forman redes compactas de tipo cúbico o hexagonal, mientras que los cationes metálicos ocupan posiciones internas, originando distintas fases cristalográficas (Joudeh & Linke, 2022).

Asimismo, cuando estas partículas entran en contacto con medios acuosos, los grupos hidroxilo ($-OH$) presentes en su superficie pueden protonarse o desprotonarse en función del pH, generando una carga superficial positiva o negativa. Esta propiedad, junto con las fuerzas de atracción y repulsión que actúan entre las partículas, determinan su estabilidad coloidal. Así, cuando predominan las fuerzas atractivas, las NPs tienden a asociarse y formar aglomerados. Este proceso puede ocurrir mediante homoaglomeración, que corresponde a la interacción entre NPs del mismo tipo, o heteroaglomeración, que implica la interacción entre NPs y otras partículas orgánicas e inorgánicas presentes en el medio (Hajra *et al.*, 2024; Negrescu *et al.*, 2022).

2.1.3 Métodos de síntesis

Los métodos de síntesis de NPs de óxidos metálicos se clasifican en dos categorías: de arriba hacia abajo (*top-down*) y de abajo hacia arriba (*bottom-up*). El enfoque *top-down* consiste en reducir el tamaño de los materiales metálicos a granel hasta alcanzar una dimensión nanométrica. Para ello, se emplean diversas técnicas físicas, tales como la molienda de bolas, ablación por láser, evaporación–condensación, pulverización catódica y deposición física de vapor. Si bien permiten obtener NPs con alta pureza química, suelen requerir equipos especializados y condiciones extremas. Además, presentan limitaciones en el control del tamaño y morfología de las partículas (Shahalaei *et al.*, 2024).

Por su parte, el enfoque *bottom-up* se basa en el ensamblaje controlado de átomos, moléculas o precursores químicos para formar estructuras nanométricas. Dentro de esta categoría se incluyen técnicas como la coprecipitación, microemulsión, método sol-gel, síntesis asistida por microondas, síntesis hidrotérmica y deposición química. Dado que estos procesos ofrecen un mayor control sobre la síntesis, permiten obtener NPs con tamaños, morfologías y propiedades mejor definidas. Sin embargo, muchos de éstos requieren del uso de reactivos químicos que pueden resultar tóxicos o limitar sus aplicaciones biológicas (Muthukrishnan *et al.*, 2025).

En este contexto, ha surgido un creciente interés en la implementación de técnicas biológicas (*síntesis verde*) que aprovechen la capacidad reductora y estabilizante de microorganismos o compuestos de plantas para promover la formación de NPs. Entre las fuentes más empleadas se encuentran bacterias, hongos, algas y extractos vegetales, cuyos metabolitos (*e.g.*, enzimas polisacáridos, ácidos orgánicos y vitaminas) participan en el crecimiento y estabilización de las partículas. Debido a estas características, la *síntesis verde* se considera una alternativa sostenible ya que reduce el uso de sustancias químicas peligrosas y favorece la obtención de NPs con mayor biocompatibilidad (Radulescu *et al.*, 2023).

2.1.4 Técnicas de caracterización

La caracterización de NPs de óxidos metálicos es fundamental para determinar sus propiedades fisicoquímicas y establecer la relación entre su estructura y funcionalidad. Con este fin, se emplean diversas técnicas analíticas orientadas a dos aspectos principales: i) determinación del tamaño, dispersión, morfología y área superficial, e ii) identificación de los grupos funcionales presentes en su superficie (Shahalaei *et al.*, 2024).

Por ejemplo, para determinar el tamaño y distribución de partícula se utilizan técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopía electrónica de transmisión (TEM) y dispersión dinámica de luz (DLS). Estas herramientas permiten obtener información sobre la morfología, dimensiones y grado de aglomeración de las NPs, así como sobre su estabilidad y comportamiento en suspensión (Wadhwa *et al.*, 2022).

Por otra parte, la difracción de rayos X (XRD) permite identificar las fases cristalinas presentes en las NPs, así como evaluar el grado de cristalinidad y estimar el tamaño promedio de los cristalitos formados durante la síntesis. A su vez, la medición del potencial zeta proporciona información sobre la carga superficial de las partículas, las interacciones electrostáticas entre ellas y la estabilidad coloidal del sistema (Wang *et al.*, 2017).

Asimismo, la identificación de grupos funcionales y compuestos presentes en la superficie de las NPs puede realizarse mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), técnica que permite detectar las vibraciones características de los enlaces químicos. De manera complementaria, la espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) permite de-

terminar la composición elemental superficial y estado de oxidación de los átomos presentes (Mourdikoudis *et al.*, 2018).

2.2 Metabolismo vegetal

El metabolismo vegetal comprende todos los procesos bioquímicos que ocurren en las plantas y que permiten su crecimiento, desarrollo, reproducción y adaptación al entorno. Éste se divide en metabolismo primario (MP) y metabolismo secundario (MS) (**Figura 2**). El MP incluye las vías metabólicas esenciales para el funcionamiento celular, responsables de la síntesis de carbohidratos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y vitaminas. Estos compuestos son fundamentales en la fisiología vegetal. En contraste, el MS conduce a la formación de compuestos especializados que, aunque no participan directamente en los procesos básicos celulares, son necesarios para la defensa e interacción de las plantas con factores bióticos y abióticos (Fang *et al.*, 2019).

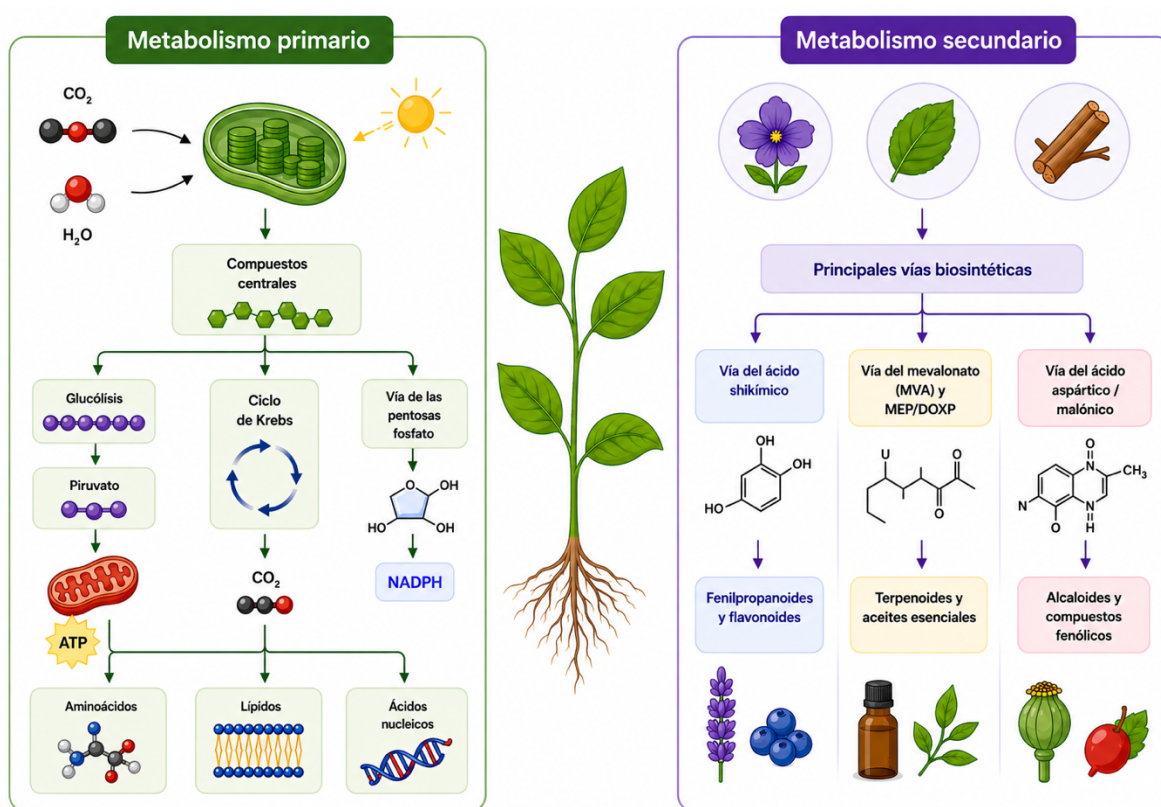


Figura 2. Tipos de metabolismo vegetal. Creado con Biorender.com.

2.2.1 Metabolitos secundarios

Los metabolitos secundarios son compuestos químicos producidos por las plantas a partir de precursores generados por el metabolismo primario. Generalmente, poseen un peso molecular relativamente bajo y se sintetizan y almacenan en órganos, tejidos, tipos celulares u organelos específicos, donde pueden acumularse sin interferir con las funciones fisiológicas básicas de la planta (Ortega-Ante *et al.*, 2025).

Debido a su amplia diversidad, estos metabolitos se clasifican principalmente en tres grupos según su estructura química y vía de síntesis: i) alcaloides, compuestos nitrogenados derivados de aminoácidos y asociados a intermediarios de la vía del ácido tricarboxílico; ii) fenoles, compuestos aromáticos que se sintetizan a través de las vías del ácido shikímico y del acetato-malonato; y iii) terpenos, constituidos por unidades repetidas de isopreno y producidos por las vías del ácido mevalónico (MVA) y del 2C-metil-D-eritritol-4-fosfato (MEP) (**Figura 2**) (Jan *et al.*, 2021).

Los metabolitos secundarios desempeñan funciones esenciales en la defensa e interacción de las plantas con su entorno. Así, actúan como mecanismo de defensa contra herbívoros y patógenos, además de participar como moléculas de señalización para regular procesos de estrés abiótico. Además, contribuyen a características fenotípicas como la pigmentación, aroma y sabor de flores y frutos, las cuales favorecen la atracción de polinizadores y dispersores de semillas (Elshafie *et al.*, 2023).

2.2.2 Diversidad química

Las plantas son capaces de sintetizar una enorme diversidad de metabolitos secundarios, con más de 200,000 compuestos identificados hasta la fecha. Esta diversidad química se caracteriza por una amplia gama de estructuras moleculares, grupos funcionales, pesos moleculares y propiedades fisicoquímicas, contribuyendo a las funciones biológicas que desempeñan estos compuestos (Reshi *et al.*, 2023).

En este contexto, Bhambhani *et al.* (2021) señalaron que los alcaloides representan aprox. 15% de los metabolitos conocidos. Debido a su elevada diversidad estructural, éstos pueden clasificarse según los precursores involucrados en su síntesis. Entre los más representativos

se encuentran los alcaloides de tipo indólicos, pirrolizidínicos, tropánicos, piperidínicos, piridínicos, quinolizidínicos, quinolínicos, xantínicos, terpenoides y esteroidales.

Por otro lado, los fenoles constituyen uno de los grupos más abundantes de metabolitos, representando aprox. 60% del total descrito en las plantas. Su clasificación se basa principalmente en la complejidad y conexión de sus estructuras, distinguiéndose tres subgrupos: i) ácidos fenólicos, derivados de los ácidos hidroxibenzoico e hidroxicinámico; ii) flavonoides, que incluyen a las isoflavonas, neoflavonoides, flavonas, flavonoles, flavanonas, flavanoles, antocianinas y chalconas; y iii) fenoles no flavonoides, entre los que destacan taninos, estilbenos, lignanos y cumarinas (Xu & Wang, 2025).

En el caso de los terpenos, Ninkuu *et al.* (2021) indicaron que éstos conforman el grupo más diverso estructuralmente hablando y comprenden aprox. 25% de los metabolitos identificados. En función del número de unidades de isopreno (C_5H_8) presentes en su estructura, se clasifican en hemiterpenos, monoterpenos, sesquiterpenos, diterpenos, triterpenos, tetraterpenos y politerpenos.

Además de estos grupos, las plantas producen otros metabolitos secundarios de importancia biológica, entre los que se encuentran las saponinas, glucosinolatos, compuestos azufrados, quinonas y betalainas. Muchos de éstos también poseen grupos funcionales reactivos (*i.e.*, hidroxilo ($-OH$), carbonilo ($C=O$), carboxilo ($-COOH$), amino ($-NH_2$) y sulfhidrilo ($-SH$)) que les confieren propiedades químicas particulares (Reshi *et al.*, 2023).

2.2.3 Métodos de extracción

El método de extracción empleado para la obtención de metabolitos secundarios influye directamente en la cantidad, composición química y actividad biológica de los extractos obtenidos. La eficiencia del proceso depende de diversos factores, incluyendo la especie vegetal, órgano utilizado (*e.g.*, hojas, tallos o flores), tipo de solvente, temperatura y tiempo de extracción, y relación sólido-líquido (Kowalski & Baj, 2025). Con base en su fundamento tecnológico, los métodos de extracción se agrupan en convencionales, no convencionales y emergentes.

Entre los métodos convencionales se encuentran la maceración, infusión, decocción, percolación, extracción Soxhlet e hidrodestilación. A pesar de su amplia aplicación, atribuida a su simplicidad, bajo costo y facilidad de operación, estos métodos presentan ciertas limitaciones

(Ortega-Ante *et al.*, 2025). Por ejemplo, Rocchetti *et al.* (2019), quienes evaluaron la extracción de fenoles de *Moringa oleífera* L. mediante maceración, reportan que el proceso requiere de tiempos prolongados y temperaturas elevadas, comprometiendo la estabilidad de algunos compuestos sensibles.

Por su parte, los métodos no convencionales incluyen a la extracción asistida por ultrasonido (UAE), extracción asistida por microondas (MAE) y extracción a alta presión (HPE), entre otras. Estas tecnologías favorecen la disrupción de las estructuras celulares y aceleran la transferencia de masa entre el material vegetal y solvente, incrementando la recuperación de los compuestos (Kowalski & Baj, 2025). En este sentido, Ochoa *et al.* (2025) observaron que la UAE y MAE mejoraron la eficiencia del proceso de obtención de alcaloides quinolínicos de *Cinchona officinalis* L., al reducir el tiempo y temperatura de extracción.

Finalmente, los métodos emergentes, basados en el uso de *tecnologías verdes*, comprenden la extracción asistida por enzimas (EAE), extracción con fluidos supercríticos (SFE), extracción por pulsos eléctricos (PEE) y extracción acelerada de disolventes (ASE). Éstos ofrecen una mayor selectividad y pureza, además de reducir el uso de solventes (Alelah *et al.*, 2026). De hecho, Mandić *et al.* (2025) reportaron que la SFE utilizando CO₂ supercrítico permitió recuperar una mayor diversidad de monoterpenos y sesquiterpenos de *Artemisia annua* L. que la obtenida mediante hidrodestilación.

2.2.4 Actividades biológicas

Los metabolitos secundarios exhiben una amplia variedad de actividades biológicas que contribuyen a la adaptación y supervivencia de las plantas (**Figura 3**). Dichas actividades han despertado un creciente interés por su aplicación potencial en la agricultura sostenible. Entre las más relevantes se encuentran la antioxidante, antibacteriana, antifúngica, insecticida y promotora del crecimiento vegetal, entre otras (Elshafie *et al.*, 2023).

En este contexto, compuestos como los ácidos fenólicos, flavonoides y taninos ejercen actividad antioxidante al neutralizar radicales libres y especies reactivas de oxígeno (ROS) a través de mecanismos de transferencia de electrones (ET) o átomos de hidrógeno (HAT) (D'Amelia *et al.*, 2018). Por otra parte, se ha reportado que monoterpenos, sesquiterpenos y alcaloides indólicos, piridínicos y esteroideos pueden inhibir el crecimiento de bacterias Gram positivas

y Gram negativas; lo anterior mediante la alteración de la permeabilidad de membrana celular, inhibición de enzimas esenciales e interferencia en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos (Huang *et al.*, 2022). De manera similar, diversos flavonoles, flavanonas, terpenoides y saponinas contribuyen a la defensa de las plantas frente a hongos fitopatógenos, ya que inhiben la germinación de esporas y limitar el crecimiento micelial (Aboody & Mickymaray, 2020).

Respecto a la actividad insecticida o repelente de ácidos fenólicos, flavonas y flavanoles, se atribuye a su capacidad para afectar procesos fisiológicos clave en los insectos, tales como la inhibición del crecimiento, alteración del sistema nervioso y modificación del comportamiento alimentario (Pereira *et al.*, 2024). Por último, algunos flavonoides, alcaloides esteroidales y sesquiterpenos actúan como promotores del crecimiento vegetal al funcionar como moléculas de señalización o bioestimulantes, que regulan procesos fisiológicos relacionados con la germinación, desarrollo radicular y absorción de nutrientes (Hao & Cai, 2026).

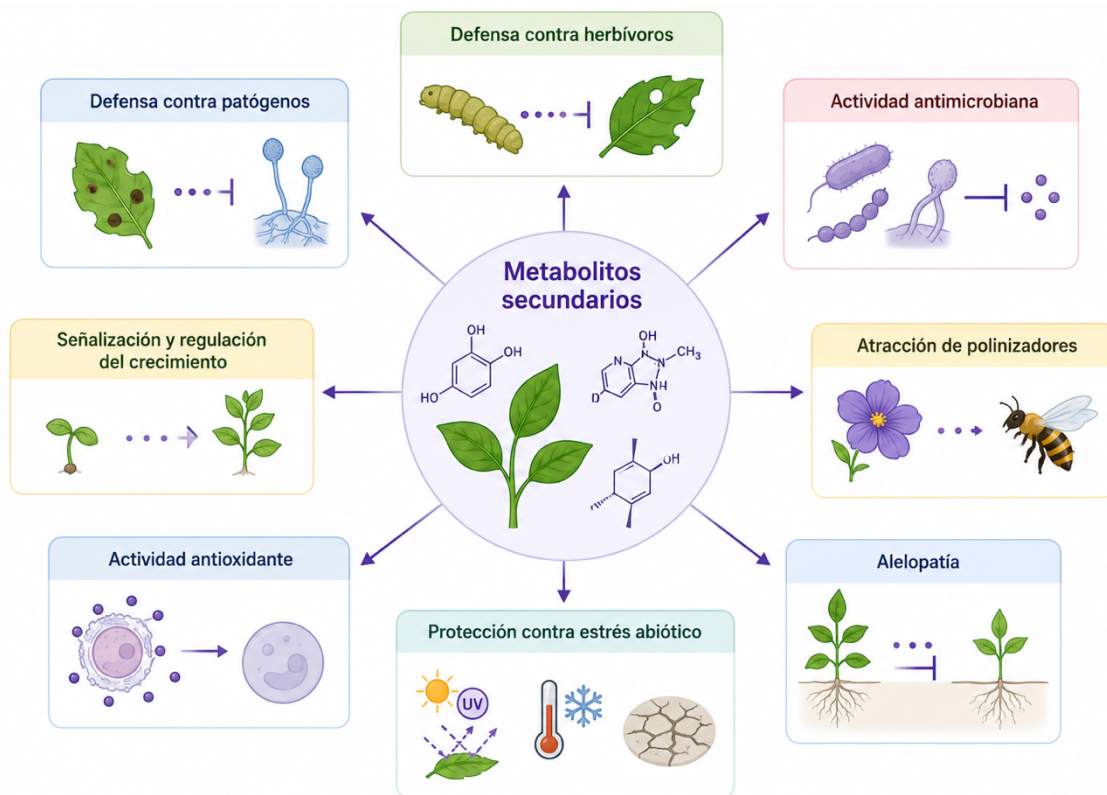


Figura 3. Principales actividades biológicas de los metabolitos secundarios. Creado con Biorender.com.

2.3 Funcionalización de nanopartículas

2.3.1 Interacción óxido metálico-metabolito secundario

La interacción entre NPs de óxidos metálicos y metabolitos ocurre principalmente en la superficie de éstas. Los iones metálicos y grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) superficiales actúan como sitios reactivos capaces de establecer asociaciones con las moléculas presentes en el extracto vegetal (Tang *et al.*, 2025). En particular, los alcaloides, fenoles y terpenos poseen múltiples grupos hidroxilo ($-\text{OH}$), carboxilo ($-\text{COOH}$) y amino ($-\text{NH}_2$), los cuales favorecen su interacción con las NPs mediante mecanismos relacionados con la adsorción superficial o complejación metálica (Lin *et al.*, 2024).

Uno de estos mecanismos es la interacción catión- π , que ocurre cuando los iones metálicos cargados positivamente (cationes) son atraídos por la nube electrónica π (rica en electrones) de los anillos aromáticos presentes en los fenoles. Otro mecanismo relevante es la formación de enlaces de coordinación. En este proceso, los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) de los alcaloides y fenoles actúan como donadores de electrones, mientras que los iones metálicos funcionan como aceptores al poseer orbitales electrónicos vacantes (sitios de coordinación) (Tang *et al.*, 2025; Xue *et al.*, 2025).

Las interacciones de tipo redox también desempeñan un papel importante, especialmente en aquellos sistemas que involucran iones metálicos con elevado potencial de reducción. En este caso, los fenoles pueden oxidarse en quinonas al ceder electrones para reducir los iones metálicos. Finalmente, las interacciones electrostáticas se producen por la atracción entre cargas opuestas del metabolito y superficie de la partícula. El pH del medio influye en el estado de protonación de los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$), carboxilo ($-\text{COOH}$) y amino ($-\text{NH}_2$), modificando su carga y afinidad por los iones metálicos (Lin *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2020).

2.3.2 Métodos de funcionalización

La funcionalización de NPs de óxidos metálicos puede realizarse mediante dos enfoques principales, según la etapa del proceso en la que se incorporen los metabolitos funcionalizantes: la modificación *in situ* y modificación *post-síntesis* (**Figura 4**). Las generalidades de ambos enfoques se describen a continuación.

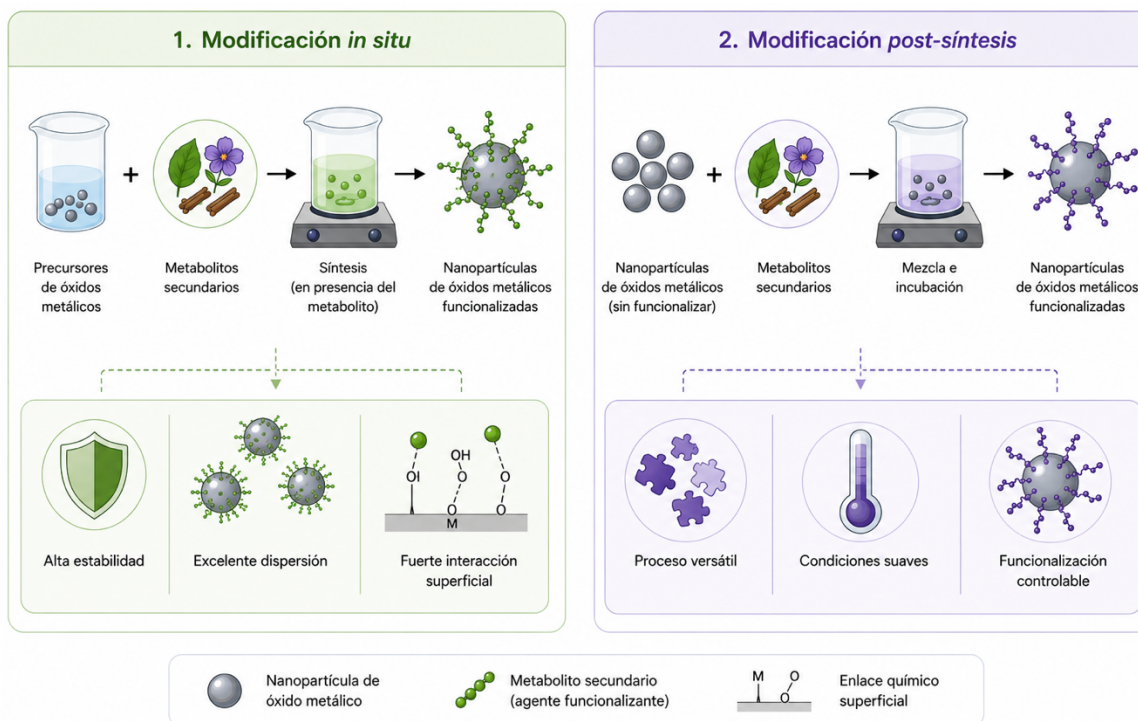


Figura 4. Métodos de funcionalización de NPs de óxidos metálicos. Creado con Biorender.com.

2.3.2.1 Modificación *in situ*

La modificación *in situ* consiste en incorporar el extracto vegetal antes o durante el proceso de síntesis de las NPs, donde que los procesos de formación y funcionalización ocurren de manera simultánea. En este enfoque, los alcaloides, fenoles y terpenos interactúan con los precursores metálicos desde las etapas iniciales de reacción, participando en la nucleación, crecimiento cristalino y desarrollo de la capa funcional superficial de las NPs (Rizvi *et al.*, 2022).

De manera general, este proceso comprende las siguientes etapas: 1) preparación del extracto vegetal, 2) preparación de la solución precursora metálica, 3) mezcla del extracto con el precursor, 4) nucleación y crecimiento de las NPs, 5) adsorción simultánea de los metabolitos sobre la superficie de las NPs y 6) purificación y recuperación del material funcionalizado (**Figura 4**) (Salehizroveh *et al.*, 2024).

Entre las principales ventajas de esta estrategia destacan la capacidad de regular la velocidad de nucleación y crecimiento cristalino, lo que permite controlar propiedades como el tamaño, morfología y grado de agregación de las NPs. Asimismo, al integrar la síntesis y funciona-

lización en una sola etapa, el proceso resulta más simple, requiere una menor cantidad de reactivos químicos y genera menos residuos (Rizvi *et al.*, 2022).

2.3.2.2 Modificación *post-síntesis*

En la modificación *post-síntesis*, el extracto vegetal se incorpora una vez que las NPs han sido sintetizadas y purificadas. A diferencia del primero, este enfoque separa los procesos de formación y funcionalización, permitiendo que los alcaloides, fenoles y terpenos se adsorban posteriormente sobre la superficie de las NPs (He *et al.*, 2023).

El procedimiento consta de las siguientes etapas: 1) síntesis de las NPs, 2) purificación y recuperación del material, 3) preparación del extracto vegetal, 4) contacto entre las NPs y extracto, 5) adsorción de los metabolitos sobre la superficie de las NPs, 6) eliminación del exceso de compuestos no unidos y 7) recuperación del material funcionalizado (**Figura 4**) (Kumar *et al.*, 2023).

La principal ventaja de este enfoque es que la síntesis y funcionalización pueden optimizarse de forma independiente. Factores como el pH, concentración de metabolitos, tiempo y temperatura de contacto, así como fuerza iónica del medio, pueden ajustarse específicamente para favorecer la interacción entre los metabolitos y la superficie del óxido metálico. Además, permite modificar NPs previamente caracterizadas y seleccionar metabolitos específicos para conferir propiedades determinadas, así como incorporarlos de forma secuencial para obtener recubrimientos superficiales más complejos (Vinukonda *et al.*, 2025).

2.3.3 Efecto en propiedades fisicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas de NPs funcionalizadas están influenciadas por la naturaleza del óxido metálico, tipo de metabolitos presentes, densidad de recubrimiento y método de funcionalización empleado. Como consecuencia, pueden producirse cambios en el tamaño, morfología, fase cristalográfica, carga superficial y reactividad química de las NPs (Sanità *et al.*, 2020).

Por ejemplo, Assad *et al.* (2024) reportaron que, durante la síntesis de NPs de ZnO funcionalizadas con un extracto de *Equisetum diffusum* D., los metabolitos presentes participaron en la reducción y estabilización del precursor metálico. La caracterización mediante SEM y DLS

reveló la formación de partículas de menor tamaño (~60 nm), con morfología esférica y superficie lisa, así como una distribución de tamaño más homogénea (*i.e.*, monomodal).

Por otro lado, González-Ballesteros *et al.* (2025) demostraron que la funcionalización de NPs de Au/TiO₂ con el flavonoide quercetina modificó su carga superficial y estructura cristalina. Las NPs presentaron valores de potencial zeta entre ± 40 y 60 mV, asociados con una alta estabilidad coloidal; mientras que, el análisis por XRD confirmó la conservación de la estructura cristalina, aunque con cambios en el tamaño de cristalito e intensidad relativa de algunos planos cristalográficos.

Finalmente, Periakaruppan *et al.* (2026) sintetizaron NPs de FeO funcionalizadas con fenoles extraídos de *Camellia sinensis* L. o *Mentha spicata* L. Independientemente de la planta, el proceso modificó la química superficial de las partículas, ya que el análisis FTIR reveló una mayor presencia de grupos hidroxilo (–OH) y carbonilo (C=O), aumentando su capacidad de reacción con otras moléculas. Asimismo, el análisis termogravimétrico (TGA) mostró una mayor estabilidad térmica, asociado a la formación de un recubrimiento estable.

2.4 Potencial agrícola de nanopartículas funcionalizadas

2.4.1 Prevención y control de plagas

La incidencia de plagas es uno de los principales factores que limitan la productividad agrícola a nivel mundial. Durante años, su control ha dependido del uso de insecticidas químicos; sin embargo, la aplicación excesiva de estos productos ha provocado problemas de contaminación ambiental. En este contexto, las NPs de óxidos metálicos funcionalizadas con metabolitos secundarios han emergido como una alternativa para el desarrollo de estrategias de protección vegetal más sostenibles (Shandila *et al.*, 2025).

Por ejemplo, NPs de Fe₃O₄ funcionalizadas con un extracto de *Polygonum paronychioides* L. demostraron un potencial insecticida contra el gorgojo rojo de la harina (*Tribolium castaneum*) y gorgojo dentado del grano (*Oryzaephilus surinamensis*), dos plagas de importancia económica en el almacenamiento de granos. Las NPs alcanzaron tasas de mortalidad de aprox. 80-90% en ambas especies (Mushtaq *et al.*, 2025).

De manera similar, NPs de ZnO recubiertas con extracto de *Pongamia pinnata* L. exhibieron una fuerte actividad insecticida contra el gorgojo del frijol (*Callosobruchus maculatus*).

Además de reducir la fecundidad y eclosión de los huevos, se retrasó el desarrollo larvario y pupal, y consiguió una mortalidad del 100% en adultos a una dosis de $25 \mu\text{g mL}^{-1}$ (Malaikozhundan & Vinodhini, 2018).

Por último, en el escarabajo del sauce (*Plagioderia versicolora*), la exposición a NPs de ZnO funcionalizadas utilizando un extracto de *Croton tiglium* L. indujo alteraciones y lesiones celulares, así como necrosis en el epitelio del intestino medio. También se observó una reducción dosis-dependiente ($6.25\text{-}50 \text{ mg mL}^{-1}$) de la supervivencia de los escarabajos (Ali *et al.*, 2026).

2.4.2 Prevención y control de enfermedades

Bacterias, hongos y virus fitopatógenos afectan el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos, generando importantes pérdidas económicas y comprometiendo la seguridad alimentaria (Cruz-Luna *et al.*, 2023). En este sentido, diversos estudios han demostrado la eficacia de las NPs funcionalizadas para inhibir el crecimiento de una amplia variedad de microorganismos y contribuir al control de enfermedades vegetales.

El-Abeid *et al.* (2024), sintetizaron NPs de CuO con un extracto de *Zizyphus spina* L. y evaluaron su actividad antifúngica contra *Fusarium solani*, agente causal de la pudrición de raíz en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Las NPs inhibieron ~92% del crecimiento micelial del patógeno en condiciones *in vitro* y, en ensayos *in vivo*, redujeron la severidad de la enfermedad entre 72-89% en las plantas tratadas.

De igual forma, Abbas *et al.* (2025) evaluaron *in vitro* la actividad antifúngica de NPs de CuO funcionalizadas con metabolitos extraídos de *Eucalyptus globulus* L. contra *Fusarium oxysporum* y *Fusarium solani*. Se observó una reducción del crecimiento micelial en ambos hongos de forma dosis-dependiente ($20\text{-}100 \mu\text{g mL}^{-1}$), alcanzando porcentajes de inhibición del ~80-85%.

Finalmente, Ahmad *et al.* (2020) demostraron que la funcionalización de NPs de ZnO con extracto de *Eucalyptus globulus* L. aumentó su actividad antifúngica contra *Alternaria mali*, *Botryosphaeria dothidea* y *Diplodia seriata*, asociados a enfermedades del manzano (*Malus domestica* L.). Las NPs ($100 \mu\text{g mL}^{-1}$) inhibieron el crecimiento micelial un ~76, 65 y 55%, respectivamente, además de causar deformaciones estructurales en las hifas.

2.4.3 Inducción de resistencia a estrés abiótico

Las plantas están expuestas de manera constante a condiciones ambientales adversas, como sequía, salinidad, temperaturas extremas y radiación solar intensa, que pueden limitar su crecimiento y desarrollo. Al respecto, se ha reportado que las NPs funcionalizadas pueden mejorar la tolerancia vegetal frente a estas condiciones, favoreciendo la adaptación y desempeño fisiológico de las plantas (Manzoor *et al.*, 2025).

En un estudio reciente, NPs de ZnO sintetizadas mediante un extracto obtenido de cáscaras de maíz (*Zea mays* L.) fueron empleadas para el cebado (*priming*) de semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.). Bajo condiciones de estrés hídrico, las plantas provenientes de semillas tratadas presentaron una reducción del ~30-45% en la actividad de las enzimas antioxidantes catalasa (CAT), peroxidasa (POX) y glutatión reductasa (GR), asociadas con la mitigación del daño oxidativo (Rizk *et al.*, 2025).

Asimismo, se evaluó la germinación de semillas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) bajo condiciones de estrés hídrico. El *priming* (40 mg L⁻¹) con NPs de Fe₃O₄ recubiertas con extracto de *Ginkgo biloba* L. potenció el desempeño de las semillas, al aumentar el porcentaje de germinación, índice de vigor y actividad de α -amilasa en 22%, 189% y 35%, respectivamente, además de estimular el desarrollo radicular (Wang *et al.*, 2025).

Por su parte, NPs de MoO₃ funcionalizadas con extracto de fruto de *Medicago polymorpha* L. fueron aplicadas vía foliar en plantas de molokhia (*Corchorus olitorius* L.) sometidas a estrés salino. El tratamiento (50 mg L⁻¹) mejoró longitud de brotes (19%), longitud de raíces (26%), peso fresco total (65%) y contenido de pigmentos fotosintéticos (33-67%). También se promovió la expresión de genes relacionados con la respuesta al estrés (*e.g.*, *SOD1*, *CAT2*, *PAL* y *FLS*) (Elsherif *et al.*, 2026).

2.4.4 Estimulación del crecimiento vegetal

El crecimiento vegetal depende de una compleja interacción entre factores genéticos, fisiológicos y ambientales. En este contexto, las NPS de óxidos metálicos funcionalizadas con metabolitos secundarios han cobrado especial relevancia por su capacidad para estimular procesos fisiológicos y metabólicos relacionados con el desarrollo y establecimiento de las plantas bajo distintas condiciones de cultivo (Anuta *et al.*, 2025).

Por ejemplo, Sánchez-Pérez *et al.* (2023) reportaron que NPs de ZnO obtenidas mediante un extracto de *Larrea tridentata* L. favorecieron la germinación y crecimiento inicial de plántulas de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.). El tratamiento con 200 mg L⁻¹ mostró los valores más altos de germinación (90%) e índice de vigor de semilla (400), además de un mayor crecimiento radicular (longitud= 22.7 mm), acumulación de peso fresco (PF, 13.4 mg) y contenido total de clorofila (8 mg g⁻¹ PF) y carotenoides (3 mg g⁻¹ PF).

Por otro lado, El-Tanbouly *et al.* (2025) demostraron que la funcionalización de NPs de CuO con compuestos extraídos de *Moringa oleífera* L. promovió el crecimiento de tomate (*S. lycopersicum* L.). Las plantas tratadas presentaron una menor incidencia de clorosis foliar, así como incrementos en la longitud de brotes (11%), longitud de raíces (21%), peso seco total (34%) y contenido total de clorofila (32%) en comparación con las plantas no tratadas.

Por último, Ain *et al.* (2025) sintetizaron NPs de FeO, ZnO y Zn-Fe a partir de extractos de *M. oleífera* L. y evaluaron su efecto, en combinación con el hongo micorrícico *Funneliformis mosseae*, sobre el crecimiento de maíz (*Z. mays* L.). Las NPs de ZnO y Zn-Fe destacaron por su efecto bioestimulante, al aumentar el peso fresco aéreo (53-79 %), peso fresco de raíces (71-139%), producción de ácidos orgánicos (48-129%) y absorción de nutrientes (145-295%).

III. CONCLUSIONES

Las nanopartículas (NPs) de óxidos metálicos representan una de las herramientas más prometedoras para el desarrollo de una agricultura más eficiente y sostenible. En particular, su funcionalización con metabolitos de origen vegetal permite modificar sus propiedades superficiales y potenciar su compatibilidad, así como su actividad biológica.

Esta monografía evidenció que la incorporación de compuestos como alcaloides, flavonoides y terpenos, ya sea mediante modificación *in situ* o *post-síntesis*, permite aprovechar su diversidad estructural y funcional para desarrollar NPs con propiedades únicas o superiores, lo que amplía su posibilidad de aplicación en los sistemas de cultivo.

La evidencia científica disponible demuestra que las NPs pueden contribuir al control de plagas y enfermedades, aumentar la tolerancia frente a condiciones de estrés abiótico y estimular procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y desarrollo vegetal. En conjunto, estos efectos resaltan su potencial para mejorar la productividad y resiliencia de los cultivos.

Sin embargo, para consolidar su aplicación a gran escala, la elucidación de los mecanismos de interacción entre partículas y metabolitos vegetales es crucial, ya que estas interacciones modifican las propiedades fisicoquímicas y dan pauta para nuevas aplicaciones agrícolas biotecnológicas. El avance en estas áreas será esencial para favorecer su incorporación en estrategias agrícolas sostenibles y eventual comercialización.

IV. LITERATURA CITADA

- Abbas, N., Ahmed, S., Ansari, M., Alamri, S., & Alfagham, A.T. (2025). Phytogetic synthesis of copper nanoparticles by using leaf extract of *Eucalyptus globulus* and its antifungal activity against *Fusarium oxysporum* and *Fusarium Solani*. *BMC Plant Biology*, 25, 1519.
- Aboody, M.S.A., & Mickymaray, S. (2020). Anti-fungal efficacy and mechanisms of flavonoids. *Antibiotics*, 9(2), 45.
- Ahmad, H., Venugopal, K., Rajagopal, K., De Britto, S., Nandini, B., Pushpalatha, H.G., Konappa, N., Udayashankar, A.C., Geetha, N., & Jogaiah, S. (2020). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Eucalyptus globules* and their fungicidal ability against pathogenic fungi of apple orchards. *Biomolecules*, 10(3), 425.
- Ain, Q.-u., Hussain, H.A., Rahman, L., Zhang, Q., Rehman, A., Hussain, S., Uddin, S., & Imran, A. (2025). Interactive effect of *Moringa oleifera* mediated green nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi on growth, root system architecture, and nutrient uptake in maize (*Zea mays* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 226, 110063.
- Alelah, S.M.A., Abdulrazzaq, A.I., Hussein, M.O., Nasser, S.J., & Mssdf, A.K. (2026). Overview of extraction methods for phytochemicals: Principles, applications, and future directions. *Results in Chemistry*, 24, 103221.
- Alhalili, Z. (2023). Metal oxides nanoparticles: General structural description, chemical, physical, and biological synthesis methods, role in pesticides and heavy metal removal through wastewater treatment. *Molecules*, 28(7), 3086.
- Ali, A., Hassan, A., Afzal, I., Hassan, H., Chand, K., Usman, H.M., Liu, X., & Lu, M. (2026). Insecticidal and antibacterial potential of *Croton tiglium* functionalized zinc oxide nanoparticles. *International Journal of Tropical Insect Science*. <https://doi.org/10.1007/s42690-026-01875-7>.
- Anuta, V., Blidaru, A., Dinu-Pîrvu, C.E., Fierascu, R.C., Fierascu, I., Toma-Sărdărescu, D.I., Popa, L., Ghica, M.V., & Prisada, R.M. (2025). Metal-based nanoparticles with biostimulatory effects: Harnessing nanotechnology for enhanced agricultural sustainability. *Materials*, 18(13), 3142.
- Assad, N., Abbas, A., Rehman, M. F. ur, & Naeem-ul-Hassan, M. (2024). Photo-catalytic and biological applications of phyto-functionalized zinc oxide nanoparticles synthesized using a polar extract of *Equisetum diffusum* D. *RSC Advances*, 14(31), 22344-22358.
- Bhambhani, S., Kondhare, K.R., & Giri, A.P. (2021). Diversity in chemical structures and biological properties of plant alkaloids. *Molecules*, 26(11), 3374.
- Cartwright, A., Jackson, K., Morgan, C., Anderson, A., & Britt, D.W. (2020). A review of metal and metal-oxide nanoparticle coating technologies to inhibit agglomeration and increase bioactivity for agricultural applications. *Agronomy*, 10(7), 1018.

- Cruz-Luna, A.R., Vásquez-López, A., Rojas-Chávez, H., Valdés-Madrigal, M.A., Cruz-Martínez, H., & Medina, D.I. (2023). Engineered metal oxide nanoparticles as fungicides for plant disease control. *Plants*, 12(13), 2461.
- D'Amelia, V., Aversano, R., Chiaiese, P., & Carputo, D. (2018). The antioxidant properties of plant flavonoids: their exploitation by molecular plant breeding. *Phytochemistry Reviews*, 17, 611-625.
- El-Abeid, S.E., Mosa, M.A., El-Tabakh, M.A.M., Saleh, A.M., El-Khateeb, M., & Haridy, M.S.A. (2024). Antifungal activity of copper oxide nanoparticles derived from *Zizyphus spina* leaf extract against *Fusarium* root rot disease in tomato plants. *Journal of Nanobiotechnology*, 22, 28.
- El-Tanbouly, R., Gaber, M.A., Omran, S., Ahmed, N.Y., Ali, A.N., Saleh, A.H., Elgamal, A.M.R., Khafaji, N., & EL-Messeiry, S. (2025). Moringa (*Moringa oleifera*) green-synthesized copper oxide nanoparticles for the drought tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum*). *BMC Plant Biology*, 25, 685.
- Elshafie, H.S., Camele, I., & Mohamed, A.A. (2023). A comprehensive review on the biological, agricultural and pharmaceutical properties of secondary metabolites based-plant origin. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 3266.
- Elsherif, D.E., Alaziz, O.A., Rashed, E.H., Hewidy, A.M., Abdelazim, R.A., Dabash, S.A., & El-Esawy, M.A. (2026). Foliar application of green-synthesized MoO₃ nanoparticles alleviates salinity stress in molokhia by boosting antioxidant defense and stress-related gene expression. *BMC Plant Biology*, 26, 918.
- Fang, C., Fernie, A.R., & Luo, J. (2019). Exploring the diversity of plant metabolism. *Trends in Plant Science*, 24(1), 83-98.
- González-Ballesteros, N., Martins, P. M., Tavares, C. J., & Lanceros-Méndez, S. (2025). Quercetin-mediated green synthesis of Au/TiO₂ nanocomposites for the photocatalytic degradation of antibiotic ciprofloxacin. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 143, 526-537.
- Hajra, K., Maity, D., & Saha, S. (2024). Recent advancements of metal oxide nanoparticles and their potential applications: A review. *Advanced Materials Letters*, 15(1), 2401-1740.
- Hao, F., & Cai, L. (2026). Novel plant growth promoting molecules: A comprehensive review. *Advanced Agrochem.* 5(2), 89-107.
- He, W., Lv, D., Guan, Y., & Yu, S. (2023). Post-synthesis modification of metal–organic frameworks: Synthesis, characteristics, and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 11(45), 24519-24550.
- Huang, W., Wang, Y., Tian, W., Cui, X., Tu, P., Li, J., Shi, S., & Liu, X. (2022). Biosynthesis investigations of terpenoid, alkaloid, and flavonoid antimicrobial agents derived from medicinal plants. *Antibiotics*, 11(10), 1380.

- Joudeh, N., & Linke, D. (2022). Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: A comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), 262.
- Kaningini, A.G., Nelwamondo, A.M., Azizi, S., Maaza, M., & Mohale, K.C. (2022). Metal nanoparticles in agriculture: A review of possible use. *Coatings*, 12(10), 1586.
- Khatri, P., Kumar, P., Shakya, K.S., Kirlas, M.C., & Tiwari, K.K. (2024). Understanding the intertwined nature of rising multiple risks in modern agriculture and food system. *Environment, Development & Sustainability*, 26, 24107-24150.
- Kowalski, R., & Baj, T. (2025). Secondary metabolites from natural products: extraction, isolation and biological activities. *Molecules*, 30(21), 4233.
- Kumar, Y., Sinha, A.S.K., Nigam, K.D.P., Dwivedi, D., & Sangwai, J.S. (2023). Functionalized nanoparticles: Tailoring properties through surface energetics and coordination chemistry for advanced biomedical applications. *Nanoscale*, 15(13), 6075-6104.
- Lin, Z., Liu, H., Richardson, J. J., Xu, W., Chen, J., Zhou, J., & Caruso, F. (2024). Metal–phenolic network composites: From fundamentals to applications. *Chemical Society Reviews*, 53(22), 10800-10826.
- Malaikozhundan, B., & Vinodhini, J. (2018). Nanopesticidal effects of *Pongamia pinnata* leaf extract coated zinc oxide nanoparticle against the Pulse beetle, *Callosobruchus maculatus*. *Materials Today Communications*, 14, 106-115.
- Mandić, M., Ivančić, I., Cvetnić, M., Ferrante, C., Orlando, G., & Vladimir-Knežević, S. (2025). Green extraction of volatile terpenes from *Artemisia annua* L. *Molecules*, 30(7), 1638.
- Manzoor, M., Korolev, K., Maryam, & Ahmad, R. (2025). Zinc oxide nanoparticles: Abiotic stress tolerance in fruit crops focusing on sustainable production. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 94(5), 1401-1418.
- Mourdikoudis, S., Pallares, R.M., & Thanh, N.T.K. (2018). Characterization techniques for nanoparticles: Comparison and complementarity upon studying nanoparticle properties. *Nanoscale*, 10(27), 12871-12934.
- Mushtaq, H., Batool, I., Taj, M.B., Ali, O.M., Alnajeebi, A.M., Yahya, R., Alelwani, W., Alsabban, M.M., Kabrah, A., & Alghamdi, S. (2025). Phyto-mechanochemical synthesis of iron oxide nanoparticles using *Polygonum paronychioides* and their pesticidal and antimicrobial applications. *New Journal of Chemistry*, 49(27), 11705-11728.
- Muthukrishnan, S., Bhakya, S., & Ramalingam, V. (2025). Metal nanoparticles synthesis: An overview of different synthesis methods, mode of action and their biomedical application. *Discover Applied Sciences*, 7, 1079.
- Negrescu, A.M., Killian, M.S., Raghu, S.N.V., Schmuki, P., Mazare, A., & Cimpean, A. (2022). Metal oxide nanoparticles: Review of synthesis, characterization and biological effects. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(4), 274.

- Ninkuu, V., Zhang, L., Yan, J., Fu, Z., Yang, T., & Zeng, H. (2021). Biochemistry of terpenes and recent advances in plant protection. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), 5710.
- Ochoa, G., Armijos, L., Figueroa, J. G., Jaramillo-Fierro, X., & Solano-Cueva, N. (2025). Optimization of two methods for the rapid and effective extraction of quinine from *Cinchona officinalis*. *Plants*, 14(3), 364.
- Ortega-Ante, D., Noboa-Velástegui, J.A., Luna-Velasco, D.A., & Jadán, M. (2025). A review of plants' secondary metabolites: Extraction techniques and production in *in vitro* culture. *Preprints*, 2025111438.
- Pereira, V., Figueira, O., Castilho, P.C. (2024). Flavonoids as insecticides in crop protection—A review of current research and future prospects. *Plants*, 13(6), 776.
- Periakaruppan, R., Krishna, S.V.N., Samuel, V.J., Martin, J.A., Babu, D., Selvaraj, K.S.V., & Al-Dayán, N. (2026). Polyphenol-mediated iron oxide nanomaterials: biosynthesis, physicochemical characterizations, and analysis of functional groups. *JOM*, 78, 2610-2621.
- Radulescu, D.-M., Surdu, V.-A., Fikai, A., Fikai, D., Grumezescu, A.-M., & Andronescu, E. (2023). Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles: A review of the principles and biomedical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(20), 15397.
- Raut, S., Satapathy, S., Sahoo, T., Sahukar, A., Mohanty, S.S., Sahoo, A., Biswal, S.K., Panigrahi, G.K., & Sahoo, S.K. (2026). Exploring the potential of metal and metal oxide nanomaterials towards modern-day agriculture: A recent overview. *Sustainable Chemistry One World*, 9, 100184.
- Reshi, Z.A., Ahmad, W., Lukatkin, A.S., & Javed, S.B. (2023). From nature to lab: A review of secondary metabolite biosynthetic pathways, environmental influences, and *in vitro* approaches. *Metabolites*, 13(8), 895.
- Rizk, R., Ahmed, M., Abdul-Hamid, D., Zedan, M., Tóth, Z., & Decsi, K. (2025). Resulting key physiological changes in *Triticum aestivum* L. plants under drought conditions after priming the seeds with conventional fertilizer and greenly synthesized zinc oxide nanoparticles from corn wastes. *Agronomy*, 15(1), 211.
- Rizvi, M., Gerengi, H., & Gupta, P. (2022). Functionalization of nanomaterials: Synthesis and characterization. En Verma, C., Hussain, C.M., & Quraishi, M.A. (Eds.), *Functionalized nanomaterials for corrosion mitigation: Synthesis, characterization, and applications*. ACS Symposium Series, United States, pp. 1-26.
- Rocchetti, G., Blasi, F., Montesano, D., Ghisoni, S., Marcotullio, M. C., Sabatini, S., Bertoldi, D., & Lucini, L. (2019). Impact of conventional/non-conventional extraction methods on the untargeted phenolic profile of *Moringa oleifera* leaves. *Food Research International*, 115, 319-327.
- Salehizozveh, M., Dehghani, P., & Mijakovic, I. (2024). Synthesis, functionalization, and biomedical applications of iron oxide nanoparticles (IONPs). *Journal of Functional Biomaterials*, 15(11), 340.

- Sánchez-Pérez, D.M., Márquez-Guerrero, S.Y., Ramírez-Moreno, A., Rodríguez-Sifuentes, L., Galindo-Guzmán, M., Flores-Loyola, E., & Marszalek, J.E. (2023). Impact of biologically and chemically synthesized zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedlings' growth. *Horticulturae*, 9(11), 1201.
- Sanità, G., Carrese, B., & Lamberti, A. (2020). Nanoparticle surface functionalization: how to improve biocompatibility and cellular internalization. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 7, 587012.
- Schiopu, A.-G., Iordache, D.M., Oproescu, M., Cursaru, L.M., & Ioța, A.-M. (2024). Tailoring the synthesis method of metal oxide nanoparticles for desired properties. *Crystals*, 14(10), 899.
- Sen, B., Roy, D., Narayan, M., & Sarma, H. (2025). Nanoparticle-driven stress alleviation: Exploring the roles of metal and metal oxide nanoparticles in plant abiotic stress management. *Discover Plants*, 2, 74.
- Shahalaei, M., Azad, A.K., Sulaiman, W.M.A.W., Derakhshani, A., Mofakham, E.B., Mallandrich, M., Kumarasamy, V., & Subramaniyan, V. (2024). A review of metallic nanoparticles: present issues and prospects focused on the preparation methods, characterization techniques, and their theranostic applications. *Frontiers in Chemistry*, 12, 1398979.
- Shandila, P., Mahatmanto, T., & Hsu, J.-L. (2025). Metal-based nanoparticles as nanopesticides: opportunities and challenges for sustainable crop protection. *Processes*, 13(5), 1278.
- Tang, Z., Huang, Z., Huang, Y., Huang, M., Liu, H., Du, J.-Z., & Jia, B. (2025). Nanomedicine's shining armor: Understanding and leveraging the metal-phenolic networks. *Journal of Nanobiotechnology*, 23, 158.
- Vinukonda, A., Bolledla, N., Jadi, R.K., Chinthala, R., & Devadasu, V.R. (2025). Synthesis of nanoparticles using advanced techniques. *Next Nanotechnology*, 8, 100169.
- Wadhwa, P., Sharma, S., Sahu, S., Sharma, A., & Kumar, D. (2022). A review of nanoparticles characterization techniques. *Current Nanomaterials*, 7(3), 202-214.
- Wang, C., Gao, X., Chen, Z., Chen, Y., & Chen, H. (2017). Preparation, characterization and application of polysaccharide-based metallic nanoparticles: A review. *Polymers*, 9(12), 689.
- Wang, X., Ge, M., & He, X. (2025). Effect of green synthesized Fe₃O₄NP priming on alfalfa seed germination under drought stress. *Plants*, 14(8), 1236.
- Xu, L., & Wang, X. (2025). A comprehensive review of phenolic compounds in horticultural plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(12), 5767.
- Xue, S., Tan, W., Mao, S., Pan, H., Ye, X., Donlao, N., & Tian, J. (2025). Polyphenol-based functional materials: Structural insights, composite strategies, and biomedical applications. *Advanced Science*, 12(39), e08924.
- Zhou, J., Lin, Z., Ju, Y., Rahim, M. A., Richardson, J. J., & Caruso, F. (2020). Polyphenol-mediated assembly for particle engineering. *Accounts of Chemical Research*, 53(7), 1269-1278.