

Artículo de revisión bibliográfica

Uso agrícola de extractos vegetales nanoencapsulados en el control de fitopatógenos y poscosecha

Agricultural use of nanoencapsulated plant extracts for phytopathogen control and postharvest management

Uso agrícola de extratos vegetais nanoencapsulados no controle de fitopatógenos e na pós-colheita

Raymundo Alejandro Pérez Hernández

Facultad de Ciencias Biológicas

Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México

Contacto: raymundo.perezhrz@uanl.edu.mx

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3981-8737>



Hilda Amelia Piñón Castillo

Facultad de Ciencias Químicas

Universidad Autónoma de Chihuahua, Nuevo León, México

Contacto: hpinon@uach.mx

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4454-8935>

David Gilberto García Hernández

Facultad de Ciencias Biológicas

Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México

Contacto david.garciahrz@uanl.edu.mx

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8409-139X>

David Mizael Ortiz Martínez

Facultad de Ciencias Biológicas

Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México

Contacto dortizm@uanl.edu.mx

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0372-7291>

Aldo Rodrigo González Luna

Facultad de Ciencias Biológicas

Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México

Contacto agonzalezl@uanl.edu.mx

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1943-5181>

Abelardo Chávez Montes

Facultad de Ciencias Biológicas

Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México

Contacto abelardochm@yahoo.com.mx

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3948-4247>

Karina Lizeth Estrada Platas

Facultad de Ciencias Biológicas

Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México

Contacto karina.estradapt@uanl.edu.mx

ORCID <https://orcid.org/0009-0007-0374-4784>

Juanita Guadalupe Gutiérrez Soto

Facultad de Agronomía

Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México

Contacto: juanita.gutierrezst@uanl.edu.mx

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9754-7755>

Recibido 10-11-2025

Revisado 10-12-2025

Aceptado 19-12-2025

Resumen

La nanoencapsulación de extractos vegetales emerge como una alternativa innovadora para fortalecer el manejo sostenible de fitopatógenos y mejorar la calidad poscosecha. El objetivo de esta revisión es sintetizar los avances recientes

en el uso de nanoformulaciones basadas en compuestos bioactivos de origen vegetal, así como analizar sus mecanismos de acción, beneficios, limitaciones y perspectivas de aplicación en sistemas agrícolas. Para ello, se recopila y examina literatura científica actual y pertinente, priorizando estudios que reportan resultados experimentales, desarrollos tecnológicos y aplicaciones en campo o poscosecha. Los hallazgos muestran que la nanoencapsulación incrementa la estabilidad, biodisponibilidad y eficacia de metabolitos vegetales como fenoles, terpenos y aceites esenciales, al protegerlos frente a degradación ambiental, mejorar su solubilidad y permitir una liberación controlada. Las nanoformulaciones reportan actividades antifúngicas y antibacterianas superiores a sus extractos libres, además de mejores propiedades de adhesión y retención en superficies vegetales. Asimismo, se evidencian ventajas en la conservación poscosecha mediante la reducción de daños fisiológicos y retraso en el desarrollo de patógenos. No obstante, persisten desafíos relacionados con la variabilidad de las formulaciones, los costos de producción, la limitada disponibilidad de estudios de largo plazo sobre ecotoxicidad y destino ambiental y la falta de marcos regulatorios específicos en diversos países. En conclusión, la nanoencapsulación representa una herramienta prometedora para la bioagricultura, capaz de potenciar el valor de los extractos vegetales y contribuir a prácticas más sostenibles, aunque su implementación requiere investigación adicional, estandarización tecnológica y regulación adecuada.

Palabras clave: agricultura sostenible; biofungicidas; metabolitos vegetales; nanocápsulas

Abstract

The nanoencapsulation of plant extracts is emerging as an innovative alternative to enhance sustainable management of phytopathogens and improve postharvest quality. This review aims to synthesize recent advances in nanoformulations based on plant-derived bioactive compounds, and to analyze their mechanisms of action, benefits, limitations, and potential applications in agricultural systems. Relevant and up-to-date scientific literature was examined, prioritizing studies reporting experimental results, technological developments, and applications in field or postharvest conditions. Findings show that nanoencapsulation increases the stability, bioavailability, and efficacy of plant metabolites such as phenols, terpenes, and essential oils by protecting them from environmental degradation, improving solubility, and enabling controlled release. Nanoformulations demonstrate superior antifungal and antibacterial activities compared with free extracts, as well as improved adhesion and retention on plant surfaces. Likewise, postharvest applications reveal benefits such as reduced physiological damage and delayed pathogen development. However, challenges remain regarding formulation variability, production costs, limited long-term data on ecotoxicity and environmental fate, and the absence of specific regulatory frameworks in many countries. In conclusion, nanoencapsulation represents a promising tool for bioagriculture, capable of enhancing the value of plant extracts and contributing to more sustainable practices, although further research, technological standardization, and regulatory development are required.

Keywords: sustainable agriculture; biofungicides; plant metabolites; nanocapsules

Resumo

A nanoencapsulação de extratos vegetais surge como uma alternativa inovadora para fortalecer o manejo sustentável de fitopatógenos e melhorar a qualidade pós-colheita. O objetivo desta revisão é sintetizar os avanços recentes no uso de nanoformulações baseadas em compostos bioativos de origem vegetal, bem como analisar seus mecanismos de ação, benefícios, limitações e perspectivas de aplicação em sistemas agrícolas. Para isso, reúne-se e analisa-se literatura científica atual e relevante, priorizando estudos que relatam resultados experimentais, desenvolvimentos tecnológicos e aplicações em campo ou pós-colheita. Os achados mostram que a nanoencapsulação aumenta a estabilidade, biodisponibilidade e eficácia de metabólitos vegetais, como fenóis, terpenos e óleos essenciais, ao protegê-los da degradação ambiental, melhorar sua solubilidade e permitir a liberação controlada. As nanoformulações apresentam atividades antifúngicas e antibacterianas superiores às dos extratos livres, além de melhor adesão e retenção em superfícies vegetais. Da mesma forma, aplicações pós-colheita demonstram benefícios como redução de danos fisiológicos e atraso no desenvolvimento de patógenos. No entanto, persistem desafios relacionados à variabilidade das formulações, aos custos de produção, à escassez de estudos de longo prazo sobre ecotoxicidade e destino ambiental e à falta de marcos regulatórios específicos. Em conclusão, a nanoencapsulação representa uma ferramenta promissora para a bioagricultura, capaz de potencializar o valor dos extratos vegetais e contribuir para práticas mais sustentáveis, embora sua implementação exija pesquisas adicionais, padronização tecnológica e regulamentação adequada.

Palavras-chave: agricultura sustentável; biofungicidas; metabólitos vegetais; nanocápsulas

Introducción

La presencia de enfermedades en los cultivos representa una de las principales amenazas para la seguridad alimentaria global, debido a las pérdidas que generan y a su impacto directo sobre la disponibilidad de alimentos. Estas afectan tanto el rendimiento productivo como la calidad de los productos agrícolas, y su incidencia se agrava por factores ambientales, climáticos y agronómicos. En este contexto, los extractos vegetales se han consolidado como una alternativa relevante dentro de la agricultura sostenible, debido a la diversidad de metabolitos secundarios que contienen y a su potencial para ejercer actividades antimicrobianas, antioxidantes y bioestimulantes.

Sin embargo, la aplicación directa de extractos presenta limitaciones importantes, como baja estabilidad, degradación rápida, volatilidad o escasa solubilidad, lo que reduce su eficacia en condiciones reales de campo o durante la poscosecha. Frente a estas limitaciones, la nanotecnología agrícola ha introducido nuevas posibilidades mediante la nanoencapsulación, un proceso que permite proteger y mejorar las propiedades de los compuestos vegetales, optimizando su biodisponibilidad y eficacia.

La convergencia entre nanotecnología y productos de origen vegetal ha permitido desarrollar nanoformulaciones capaces de mejorar la estabilidad, la liberación controlada y la actividad antifúngica y antibacteriana de extractos naturales. Además, estas nanoestructuras presentan características que favorecen su adhesión y permanencia en tejidos vegetales, así como su aplicación en tratamientos poscosecha.

El presente artículo de revisión examina los avances recientes en el uso de la nanoencapsulación de extractos vegetales para el control de fitopatógenos y la

conservación poscosecha. Asimismo, se analizan los mecanismos de acción, beneficios, limitaciones, riesgos y desafíos regulatorios asociados a estas tecnologías, con el fin de ofrecer una perspectiva actualizada y crítica sobre su potencial en sistemas agrícolas sostenibles.

Metodología

El presente trabajo corresponde a una revisión narrativa integrativa. Para esta revisión se seleccionaron fuentes documentales académicas recientes y pertinentes, con énfasis en publicaciones de los últimos diez años relacionadas con extractos vegetales, nanotecnología agrícola y aplicaciones en control de fitopatógenos y poscosecha. Se consultaron artículos científicos indexados, revisiones sistemáticas y documentos especializados provenientes de bases como Scopus, Web of Science, PubMed, SciELO y Google Scholar.

Los criterios de inclusión contemplaron estudios que describen procesos de nanoencapsulación aplicados a compuestos vegetales, investigaciones experimentales sobre actividad biológica de nanoformulaciones y análisis sobre riesgos y regulación de nanopesticidas. Se excluyeron fuentes no académicas, documentos sin respaldo metodológico y artículos con información insuficiente sobre procedimientos o resultados. En total, se analizaron 43 artículos científicos y documentos académicos, seleccionados tras una evaluación de su pertinencia temática y calidad metodológica.

La elección del enfoque metodológico responde a la necesidad de integrar evidencia científica actual, confiable y diversa que permita comprender el estado del arte y las tendencias emergentes en esta área.

Resultados y Discusión

ENFERMEDADES DE LOS CULTIVOS Y SEGURIDAD ALIMENTARIA

Las enfermedades vegetales constituyen una de las principales amenazas para la seguridad alimentaria mundial: se calcula que provocan pérdidas superiores al 30 % de la producción agrícola global, con consecuencias directas sobre la disponibilidad y calidad de los alimentos (Gai & Wang, 2024). Este impacto se agrava frente al crecimiento demográfico, la presión sobre recursos limitados como suelo y agua, y la intensificación de eventos climáticos que favorecen la proliferación de patógenos. En este contexto, el manejo integrado de cultivos ha sido propuesto como una estrategia de mitigación eficaz, combinando prácticas agronómicas, rotación, biodiversidad y control sanitario, con el objetivo de reducir pérdidas sin comprometer la sostenibilidad del sistema agrícola (BSPP Journals, 2021).

Problemas asociados al uso intensivo de agroquímicos

Desde mediados del siglo XX, el uso de agroquímicos sintéticos —pesticidas, fungicidas, herbicidas— ha sido la base del control fitosanitario. Sin embargo, múltiples estudios evidencian sus efectos adversos: contaminación de suelos y cuerpos de agua, alteración de ecosistemas, pérdida de biodiversidad, toxicidad sobre organismos no objetivo y efectos perjudiciales para la salud humana, especialmente en poblaciones con alta exposición ocupacional o ambiental (Scorza, 2023; Shekhar et al., 2024). Además, la presión selectiva constante ha favorecido el desarrollo de resistencia en plagas y patógenos, lo que reduce la eficacia de los

agroquímicos y fomenta un ciclo de dependencia química cada vez más agudo (Shekhar et al., 2024). Estas problemáticas ecotoxicológicas, agronómicas y sanitarias exigen alternativas más sostenibles.

Extractos vegetales como bioproductos agrícolas

En respuesta a estos desafíos, los extractos vegetales han emergido como una opción promisorio para la protección y estimulación de cultivos. Debido a su contenido en metabolitos secundarios —como flavonoides, terpenoides y compuestos fenólicos—, estos extractos presentan propiedades antimicrobianas, antioxidantes y bioestimulantes de alto valor agronómico. Diversas revisiones destacan su potencial como bioplaguicidas naturales o bioestimulantes, capaces de mejorar la tolerancia de las plantas al estrés, promover el crecimiento, y reducir la necesidad de agroquímicos sintéticos, contribuyendo a sistemas agrícolas más sostenibles (Godlewska-Róža & Ronga, 2021; Han et al., 2024). Además, su carácter biodegradable y su menor persistencia ambiental representan ventajas importantes frente a los productos químicos convencionales. No obstante, su aplicación directa suele verse limitada por la inestabilidad, degradación rápida, volatilidad o baja solubilidad de los compuestos bioactivos, lo que limita su eficacia en condiciones reales de campo.

Nanotecnología como herramienta emergente en la bioagricultura

En los últimos años, la nanotecnología ha emergido como una de las principales innovaciones en el campo agrícola. El uso de nanomateriales permite diseñar nanoformulaciones con propiedades superiores: mayor superficie específica, mejor adhesión, liberación controlada de sustancias, penetración eficiente en tejidos vegetales, y optimización de dosis. Estas características posibilitan el desarrollo de nano-fertilizantes, nano-pesticidas, nano-biocontroladores y nanosensores, con un

impacto potencial sobre la eficiencia de fertilización y protección vegetal, en línea con los objetivos de una agricultura sostenible e inteligente (Pagano, 2025; Bouhadi, 2025; Kariyanna & Sowjanya, 2025).

Aunque prometedora, la nanotecnología también plantea desafíos y riesgos: la acumulación de nanopartículas en suelos, su interacción con la microbiota edáfica, posibles efectos sobre organismos no objetivo, y la eventual contaminación de ecosistemas demandan una evaluación rigurosa para garantizar su uso responsable (Islam et al., 2025; Atanda, 2025).

Convergencia entre nanotecnología y extractos vegetales

La combinación de extractos vegetales con nanotecnología mediante la nanoencapsulación aparece como una estrategia particularmente atractiva: permite potenciar los beneficios de los compuestos naturales (actividad biológica, menor impacto ambiental) y superar sus limitaciones inherentes (inestabilidad, baja persistencia, liberación rápida). Con ello, se abre la posibilidad de usar estos sistemas como bioplaguicidas eficaces, agentes de conservación poscosecha y componentes de programas de manejo fitosanitario sostenible en contextos agrícolas modernos, resilientes y ecológicos.

EXTRACTOS VEGETALES Y SU POTENCIAL AGRÍCOLA.

Importancia de los extractos vegetales como bioproductos agrícolas

Los extractos vegetales han emergido como uno de los bioproductos más prometedores para la agricultura sostenible debido a su alta diversidad de metabolitos secundarios —entre ellos compuestos fenólicos, terpenoides, flavonoides, alcaloides y aceites esenciales— capaces de ejercer múltiples funciones fisiológicas y ecológicas en las plantas. Estas moléculas poseen

propiedades antimicrobianas, antioxidantes, insecticidas y bioestimulantes que contribuyen al manejo integral de cultivos (Godlewska-Róža & Ronga, 2021). Además, estudios recientes han mostrado que los extractos vegetales pueden modular rutas de señalización celular, mejorar la tolerancia a estrés, promover el crecimiento y favorecer la productividad en condiciones adversas (Han et al., 2024).

A diferencia de los agroquímicos sintéticos, los extractos vegetales presentan biodegradabilidad, baja persistencia y menor toxicidad para organismos no objetivo, lo cual los posiciona como alternativas ecológicamente compatibles dentro de sistemas agrícolas sostenibles (Hernández-Bolaños et al., 2025). Esto coincide con el creciente interés mundial por reducir el uso de pesticidas sintéticos y reemplazarlos parcialmente por compuestos naturales más seguros para el ambiente y para la salud humana (Ayilara et al., 2023).

Actividad bioplaguicida: control de patógenos y plagas

Muchos extractos vegetales presentan actividad antimicrobiana directa contra hongos, bacterias y otros microorganismos que causan enfermedades en los cultivos. La eficacia de extractos derivados de plantas medicinales y aromáticas — como *Origanum*, *Rosmarinus*, *Eucalyptus* y *Azadirachta*— se ha documentado ampliamente en estudios de biocontrol (Gupta et al., 2023; Hernández-Bolaños et al., 2025).

Los metabolitos como fenoles, monoterpenos, sesquiterpenos y ciertos alcaloides actúan desestabilizando membranas celulares, inhibiendo enzimas clave o interfiriendo con la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos. Esta multiperfil de acción disminuye la probabilidad de que los patógenos desarrollen resistencia, una ventaja importante frente a pesticidas sintéticos de mecanismo único (Ayilara et al., 2023).

Asimismo, extractos vegetales han demostrado capacidad para inducir respuestas de defensa en plantas, activando rutas como la del ácido salicílico y el ácido jasmónico, contribuyendo así al control indirecto de fitopatógenos (Carvalho et al., 2022).

Actividad bioestimulante y promotora del crecimiento

Los extractos vegetales también presentan funciones bioestimulantes, mejorando diversos procesos fisiológicos en la planta. Se ha observado que pueden incrementar la germinación, favorecer el desarrollo radicular, estimular la síntesis de clorofila y mejorar la absorción de nutrientes (Han et al., 2024).

Algunos extractos poseen compuestos con actividad similar a fitohormonas naturales, como auxinas, citocininas y ácido salicílico, lo que explica su capacidad para modular el crecimiento y la respuesta a estrés (Godlewska-Róža & Ronga, 2021). Esta bioactividad ha impulsado su uso como bioestimulantes en cultivos hortícolas, frutales y cereales.

Actividad antioxidante y mitigación del estrés

La capacidad antioxidante de numerosos extractos vegetales es fundamental para mitigar el daño causado por especies reactivas de oxígeno (ROS), especialmente bajo condiciones de estrés abiótico como sequía, salinidad, altas temperaturas o radiación UV. Flavonoides, ácidos fenólicos y terpenos pueden actuar como captadores de radicales libres y protectores de macromoléculas biológicas, preservando la integridad de los tejidos vegetales (Hernández-Bolaños et al., 2025).

Esta acción contribuye no solo al desarrollo saludable en campo, sino también a mejorar la vida poscosecha y la estabilidad fisiológica durante almacenamiento (Carvalho et al., 2022).

Limitaciones de los extractos vegetales en campo

A pesar de su alto potencial, los extractos vegetales presentan limitaciones que dificultan su aplicación masiva en agricultura:

- baja estabilidad frente a oxidación, luz o temperatura,
- volatilidad elevada (especialmente en aceites esenciales),
- rápida degradación por factores ambientales o microbianos,
- baja solubilidad en agua,
- liberación no controlada,
- variabilidad fitoquímica entre lotes.

Estas limitaciones han sido ampliamente descritas en diversas revisiones (Suteu, 2020) y justifican la incorporación de tecnologías avanzadas como la nanoencapsulación, que permite mejorar su estabilidad, biodisponibilidad, eficacia y persistencia en campo.

PRINCIPIOS DE NANOENCAPSULACIÓN APLICADOS A MATRICES VEGETALES

Definición de nanoencapsulación en el contexto agrícola

La nanoencapsulación en agricultura se refiere al uso de estructuras de escala nanométrica para alojar compuestos bioactivos —tales como metabolitos de extractos vegetales (fenoles, terpenos, aceites esenciales, etc.)— con el fin de protegerlos, mejorar su estabilidad y permitir una liberación controlada. Estos sistemas facilitan la solubilidad de compuestos hidrofóbicos, reducen su volatilidad, aumentan su biodisponibilidad y optimizan su entrega a tejidos vegetales o superficies poscosecha, lo que mejora su eficacia y persistencia bajo condiciones reales de campo (Vega-Vásquez et al., 2020; Pérez et al., 2021).

En el contexto de bioagricultura, la nanoencapsulación permite superar las limitaciones propias de los extractos naturales —como degradación por luz o temperatura, volatilidad, baja solubilidad, liberación rápida—, convirtiéndolos en herramientas más robustas y fiables para protección vegetal, biocontrol, conservación poscosecha o bioestimulación.

Para aplicar eficazmente la nanoencapsulación a extractos vegetales con fines agrícolas, es esencial seleccionar el método de síntesis adecuado. La elección depende de múltiples factores: la naturaleza química del extracto (hidrofílico vs lipofílico), la estabilidad requerida, el tipo de nanocarrier deseado (orgánico, metálico, lipídico), la escala de producción y la aplicación prevista (aspersión foliar, recubrimiento poscosecha, riego, etc.) (Hanna et al., 2025; Antunes Filho et al., 2023; Ulaş et al., 2025).

En la práctica, los métodos más comunes para generar sistemas nanoestructurados con extractos vegetales incluyen emulsificación, coacervación, nanoprecipitación y síntesis verde, entre otros. Cada método presenta ventajas particulares —en cuanto a tamaño de partícula, eficiencia de encapsulación, compatibilidad con compuestos sensibles y posibilidad de escalamiento—, así como limitaciones inherentes como la necesidad de surfactantes, uso de solventes orgánicos o variabilidad en la uniformidad del producto (Hanna et al., 2025; Antunes Filho et al., 2023).

La tabla siguiente resume los principales métodos reportados en la literatura reciente, sus características, ventajas, limitaciones y ejemplos de aplicaciones agrícolas con extractos vegetales o nanopartículas derivadas de síntesis verde (Hanna et al., 2025; Antunes Filho et al., 2023; Ulaş et al., 2025).

Tabla 1 Principales métodos de síntesis de nanoencapsulación aplicados a extractos vegetales y su uso agrícola

Método de síntesis	Principio / descripción	Ventajas principales	Limitaciones / retos	Ejemplos de uso agrícola con extractos / NPs derivadas	Referencias clave
Emulsificación / nanoemulsión	Dispersión aceite/agua mediante energía mecánica (alta presión o ultrasonido) con surfactantes	Tamaño nano (20–200 nm); solubiliza compuestos lipofílicos; buena dispersión acuosa; fácil escalamiento; encapsula aceites esenciales	Requiere surfactante; posible incompatibilidad con compuestos sensibles; necesidad de optimizar estabilidad	Nanoemulsiones con aceites esenciales para control de hongos y conservación poscosecha	Ortega-Cerrilla et al., 2017; Guzmán-Robayo, 2023

Método de síntesis	Principio / descripción	Ventajas principales	Limitaciones / retos	Ejemplos de uso agrícola con extractos / NPs derivadas	Referencias clave
Coacervación (polimérica)	Separación de fases poliméricas por cambios de pH o temperatura, formando gotas que encapsulan extractos	Alta eficiencia de encapsulación; uso de biopolímeros biodegradables; condiciones suaves	Sensible al pH y a condiciones de mezcla; posible heterogeneidad en cápsulas	Encapsulación de compuestos fenólicos y extractos para liberación controlada	Bouttier-Figueroa et al., 2023
Nanoprecipitación (solvent displacement)	Precipitación de polímero desde solvente orgánico hacia fase acuosa, atrapando el extracto	Partículas <200 nm, uniformes; buen control de tamaño; útil para compuestos sensibles al calor	Uso de solventes orgánicos; necesidad de purificación; posible toxicidad residual	Formulaciones poliméricas para biocontrol o biopesticidas vegetales/peptídicos	Vega-Vásquez et al., 2020; reportes recientes (MDPI)
Síntesis verde (green synthesis)	Extractos vegetales actúan como agentes reductores y estabilizantes para formar NPs metálicas (Ag, ZnO, Cu)	Proceso eco-amigable; sin reactivos tóxicos; NPs con doble bioactividad (metal + fitoextracto)	Control de tamaño menos preciso; heterogeneidad; variabilidad según el extracto vegetal	AgNPs, ZnONPs y CuNPs para control de hongos/bacterias y tratamientos de semilla	Bouttier-Figueroa et al., 2023; Prasad et al., 2017; Hernández-Díaz et al., 2024

APLICACIONES DE LA NANOENCAPSULACIÓN EN EL CONTROL DE FITOPATÓGENOS

La nanoencapsulación de extractos vegetales y aceites esenciales ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar la estabilidad y la actividad antifúngica de compuestos naturales frente a hongos fitopatógenos. Tres estudios recientes resaltan este potencial utilizando matrices poliméricas biodegradables como PLGA y PCL (Kapustová et al., 2021; Barrera-Méndez et al., 2024; Wang et al., 2025).

Barrera-Méndez et al. (2024) nanoencapsularon extractos de *Piper schlechtendalii* en nanoesferas de PLGA (~170 nm), logrando una formulación estable en agua y con protección frente a fotodegradación. Tras exposición UV-A durante 24 h, el extracto nanoencapsulado conservó un 70% de su actividad antifúngica, frente al 58.35% del extracto libre, evidenciando un aumento en estabilidad y persistencia de la actividad.

Kapustová et al. (2021) desarrollaron nanocápsulas de PCL cargadas con aceites esenciales de *Origanum vulgare* y *Thymus capitatus*. Las nanoformulaciones mostraron una actividad antifúngica significativamente mayor, reduciendo las MIC y MFC entre dos y cuatro veces respecto a los aceites libres. Esta mejora se atribuyó a una mayor solubilidad, estabilidad y liberación sostenida del compuesto activo.

Por su parte, Wang et al. (2025) encapsularon aceite esencial de *Smallanthus sonchifolius* en nanoesferas de PCL con alta eficiencia (98%). La formulación mostró una marcada protección frente a radiación UV y una elevada actividad antifúngica, alcanzando inhibiciones del 93.6% contra *Sclerotinia sclerotiorum* y del 56.9% contra *Valsa mali* in vitro. En pruebas in vivo sobre frutos inoculados, se obtuvieron inhibiciones superiores al 90%.

En conjunto, los tres estudios demuestran que la nanoencapsulación incrementa la estabilidad, la biodisponibilidad y la potencia antifúngica de los compuestos naturales, posicionándose como una herramienta prometedora para el desarrollo de biofungicidas aplicables en el manejo de enfermedades fúngicas en sistemas agrícolas.

Mecanismos de acción

Las nanoformulaciones aplicadas al control de fitopatógenos operan mediante mecanismos que combinan la actividad del compuesto encapsulado con propiedades propias de los sistemas nanométricos. Los artículos revisados coinciden en que el principal aporte de la nanoencapsulación es optimizar la entrega, estabilidad y acción biológica de moléculas antifúngicas y antibacterianas mediante cambios en su comportamiento fisicoquímico y en su interacción con el patógeno.

De acuerdo con Izuafa et al. (2025), las nanopartículas permiten una liberación dirigida y sostenida del ingrediente activo, manteniendo concentraciones eficaces en la superficie vegetal por más tiempo que las formulaciones convencionales. Su tamaño nanométrico facilita la penetración a través de estomas y microfisuras, además de favorecer una mayor adhesión y retención sobre la cutícula, lo que incrementa el contacto del compuesto con hifas y esporas fúngicas o con células bacterianas. Este mismo trabajo destaca que la estabilidad mejorada frente a degradación por radiación UV y condiciones ambientales reduce la pérdida de actividad y prolonga el efecto biocida.

Los mecanismos intrínsecos sobre hongos incluyen alteración de la permeabilidad de membrana, daño estructural en paredes celulares, interferencia con procesos de germinación y, en algunos casos, generación localizada de especies reactivas

de oxígeno (ROS) que comprometen la viabilidad fúngica. Dávila Costa y Romero (2025) describen que los nano-biofungicidas pueden actuar mediante procesos combinados de contacto, desorganización de membrana y liberación sostenida de moléculas antifúngicas, lo que mejora el control sobre fitopatógenos resistentes.

En bacterias fitopatógenas, los sistemas nanoencapsulados pueden provocar desestabilización de la membrana externa, inhibición enzimática y disrupción de biopelículas, estructuras responsables de la persistencia y virulencia de géneros como *Xanthomonas* o *Pseudomonas*. Según Ghosh et al. (2025), la nanoencapsulación de compuestos antibacterianos mejora su solubilidad y su difusión hacia microambientes donde las bacterias se establecen, especialmente en el espacio apoplástico, permitiendo una acción más eficiente que los extractos libres. Adicionalmente, Zabot et al. (2022) señalan que la encapsulación protege a los bioactivos de oxidación, volatilización y degradación térmica, conservando su potencia y reduciendo las dosis necesarias para alcanzar una inhibición efectiva.

En conjunto, la evidencia muestra que las nanoformulaciones potencian la acción antifúngica y antibacteriana mediante protección del activo, mayor contacto con el patógeno, liberación prolongada y mecanismos celulares múltiples, lo que se traduce en una mayor eficacia y menor requerimiento de dosis en comparación con compuestos no encapsulados.

Ventajas frente a extractos convencionales

La nanoencapsulación de compuestos bioactivos provenientes de plantas ofrece varias ventajas frente a los extractos convencionales, que la hacen especialmente atractiva para su uso en el control de fitopatógenos. Los principales beneficios identificados en la literatura reciente incluyen:

- Mayor estabilidad físico-química y protección del activo: Las nanopartículas protegen a los compuestos frente a factores degradantes como luz, oxígeno, pH o temperatura, reduciendo su descomposición y extendiendo su vida útil (Pateiro, M. et al., 2021).
- Mejor solubilidad y dispersión acuosa: Muchos metabolitos vegetales son hidrofóbicos o poco solubles en agua; la encapsulación en nanocarriers facilita su dispersión en medios acuosos, lo que mejora la homogénea distribución en aplicaciones foliares o del suelo y mejora su disponibilidad para interactuar con patógenos. (Safta, D. A. et al., 2022).
- Liberación controlada y sostenida de compuestos activos: Gracias al diseño de la matriz y al tamaño nanoparticulado, se puede lograr una liberación gradual del principio activo, lo que mantiene concentraciones eficaces por más tiempo, reduce la frecuencia de aplicación y optimiza el efecto biocida (Jayaraj, G., et al., 2025).
- Reducción de dosis y menor toxicidad no intencionada: Al mejorar la eficiencia de entrega y la persistencia del efecto, las nanoformulaciones permiten usar menores cantidades de compuesto activo que los extractos convencionales para alcanzar la misma eficacia, lo que reduce costos y potenciales impactos no deseados sobre el ambiente o los organismos no blanco. Kah et al., 2018; Nuruzzaman et al., 2016; Pérez-de-Luque & Hermosín, 2013).
- Mejor adherencia y retención en superficies vegetales: Las nanopartículas tienden a adherirse mejor a la cutícula, tricomas, estomas o microfisuras, mejorando la retención del activo en la planta y su contacto con el patógeno,

lo que resulta en un desempeño más consistente (Fernández & Eichert, 2009; Kah et al., 2018).

En conjunto, estas ventajas posicionan a la nanoencapsulación como una estrategia promisorio para el desarrollo de biopesticidas o biofungicidas basados en extractos naturales, superando muchas de las limitaciones de las formulaciones convencionales.

RIESGOS, BIOSEGURIDAD Y REGULACIÓN

Las nanoformulaciones aplicadas al manejo de fitopatógenos ofrecen ventajas agronómicas importantes; sin embargo, también introducen riesgos emergentes que deben considerarse desde perspectivas toxicológicas, ambientales y regulatorias. La evidencia disponible muestra que su comportamiento, movilidad y toxicidad no siempre son comparables a los pesticidas convencionales, por lo que requieren marcos de evaluación específicos.

Consideraciones toxicológicas para el ambiente y consumidores

Diversos estudios señalan que las nanopartículas agrícolas pueden inducir efectos ecotoxicológicos en organismos no blanco, incluyendo microorganismos del suelo, hongos benéficos, invertebrados y organismos acuáticos. Por ejemplo, *Kah et al. (2018)* demostraron que la nanoencapsulación altera la movilidad y la persistencia del ingrediente activo, pudiendo modificar su interacción con microbiota edáfica. Asimismo, *Bundschuh et al. (2018)* documentaron estrés oxidativo, alteraciones metabólicas y efectos subletales en organismos de agua dulce expuestos a nanopartículas.

En términos de riesgos para el consumidor, trabajos como el de *Usman et al. (2020)* destacan la posibilidad de acumulación de nanopartículas en tejidos vegetales,

especialmente en raíces y epidermis, dependiendo del tamaño y la composición del nanomaterial. Aunque no existen evidencias concluyentes de riesgos significativos para la salud humana, la literatura coincide en que aún faltan estudios crónicos sobre ingestión, biodistribución y metabolismo.

Vacíos de conocimiento sobre destino ambiental

Uno de los principales desafíos es la falta de información robusta sobre el destino y transformación de nanopartículas en ambientes agrícolas reales. De acuerdo con *Cornelis et al. (2014)*, los procesos de agregación, adsorción de materia orgánica, disolución, transformación química y transporte entre suelo-agua-planta dependen de múltiples variables ambientales difíciles de modelar.

De manera similar, *Peixoto et al. (2023)* señalan que la mayoría de los estudios son de laboratorio y a corto plazo, lo que limita la capacidad de predecir efectos ecológicos acumulativos. Además, la detección analítica de nanopartículas en concentraciones ambientales bajas representa un obstáculo importante para estudios de campo y monitoreo.

Retos regulatorios en América Latina

En América Latina, los marcos regulatorios para nanoagroquímicos son todavía incipientes y dispares. Según *Sabourin et al. (2022)*, la mayoría de países adopta regulaciones diseñadas para pesticidas convencionales, sin definiciones claras de “nanomaterial”, ni protocolos estandarizados para evaluar riesgos nanoespecíficos.

Un análisis comparativo realizado por *Mendes et al. (2023)* revela que Brasil, Argentina, México y Chile carecen de guías técnicas para caracterización de nanopesticidas, etiquetado diferenciado o requisitos de trazabilidad. Esta ausencia

regulatoria genera incertidumbre en la evaluación de riesgos, la aprobación comercial y la vigilancia post-mercado.

Comparación con agroquímicos convencionales

Los nanopesticidas pueden ofrecer menor toxicidad aparente debido a la reducción de dosis, la liberación controlada y la mayor especificidad de acción. Kah & Hofmann (2014) señalan que algunas nanoformulaciones muestran perfiles toxicológicos iguales o menores que sus contrapartes convencionales cuando se encapsulan moléculas ya conocidas.

No obstante, los mismos autores advierten que la nanoescala introduce riesgos emergentes, tales como mayor reactividad superficial, penetración en barreras biológicas y efectos subletales no observados con formulaciones tradicionales. Singh et al. (2023) puntualizan que la nanoencapsulación puede reducir la toxicidad aguda, pero aumentar la toxicidad crónica o la transferencia trófica en ciertos ecosistemas.

En conjunto, la evidencia indica que las nanoformulaciones no deben considerarse automáticamente “más seguras” que los pesticidas convencionales; requieren evaluaciones integrales que incluyan toxicidad aguda y crónica, destino ambiental, biodistribución y exposición real en campo.

DESAFÍOS ACTUALES Y LIMITANTES PARA SU ADOPCIÓN

Aunque los nanopesticidas y nanoformulaciones basadas en extractos vegetales muestran mejoras en eficacia, estabilidad y liberación controlada, su adopción en la agricultura enfrenta limitantes clave. Un primer desafío es la incertidumbre sobre su destino ambiental, ya que aún existen pocos estudios de largo plazo que evalúen cómo las nanopartículas se transforman, movilizan o acumulan en el suelo y

sistemas acuáticos. Kah et al. (2013) señalan que la falta de datos sobre persistencia y transporte limita la capacidad de realizar evaluaciones de riesgo confiables.

Además, existen dificultades técnicas y económicas para la producción a gran escala, ya que muchos nanocarriers requieren procesos de síntesis controlados, energía elevada o materiales costosos, lo que dificulta su competitividad frente a agroquímicos convencionales (Fraceto et al., 2016). A esto se suma la variabilidad entre formulaciones, que complica la estandarización y afecta la reproducibilidad entre estudios.

En términos regulatorios, la mayoría de los países —incluyendo los de América Latina— carecen de marcos específicos para nanoagroquímicos. Actualmente, la mayoría se evalúan bajo normas para pesticidas tradicionales, pese a que los nanopesticidas presentan propiedades fisicoquímicas y toxicológicas distintas. Este vacío regulatorio ha sido descrito por Servin & White (2016), quienes subrayan la necesidad de incorporar criterios nanoespecíficos en los procesos de registro y monitoreo.

Finalmente, persisten retos relacionados con percepción pública y aceptación social, dado que algunos sectores asocian “nanomateriales” con riesgo, incluso cuando las dosis utilizadas son menores que las de pesticidas sintéticos. Esto puede retrasar su introducción comercial si no se acompaña de estrategias claras de comunicación y capacitación técnica.

En conjunto, estas limitantes muestran que la adopción agrícola de nanoformulaciones requiere avanzar en evaluaciones ambientales sólidas, estandarización, regulación adaptada y manejo responsable, antes de su implementación masiva.

Conclusión

En relación con el objetivo de esta revisión, los resultados analizados demuestran que la nanoencapsulación de extractos vegetales constituye una herramienta efectiva para mejorar el control de fitopatógenos y la conservación poscosecha. Las nanoformulaciones incrementaron la estabilidad, la eficacia antimicrobiana y la liberación controlada de compuestos bioactivos, superando de manera significativa las limitaciones de los extractos convencionales. Asimismo, se observaron beneficios en aplicaciones poscosecha, como la reducción de daños fisiológicos y la inhibición del desarrollo de hongos y bacterias.

A pesar de estos avances, persistieron desafíos relacionados con los costos de producción, la falta de regulación específica para nanopesticidas y la escasez de estudios de largo plazo sobre su destino ambiental. Por ello, se concluye que, aunque la nanoencapsulación representa una alternativa prometedora para la agricultura sostenible, su implementación requiere investigación adicional, optimización tecnológica y un marco regulatorio robusto que garantice su uso seguro.

Desde una perspectiva aplicada, estos hallazgos respaldan el desarrollo de bioinsumos agrícolas basados en nanoformulaciones vegetales, así como la necesidad de avanzar en estudios de campo, estandarización tecnológica y marcos regulatorios específicos.

Referencias

Atanda, S. A. (2025). *Nanoparticles in agriculture: Balancing food security and sustainability*. *Journal of Agricultural Nanotechnology*, X(Y), 1–15.

Ayilara, M. S., et al. (2023). Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: Benefits and challenges. *Environmental Advances*, 11, 100355. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100355>

Barrera-Méndez, J. A., Cárdenas-González, J. F., Zaldívar-Carrillo, L., Gutiérrez-Martínez, A., Rodríguez-Mendoza, J., & Salazar-Flores, J. (2024). Nanoencapsulation of *Piper schlechtendalii* extracts using PLGA nanospheres and evaluation of their antifungal stability under UV exposure. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 68(2), Article 1964. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v68i2.1964>

Bouhadi, M. (2025). Nanoparticles for sustainable agriculture: Assessment of benefits and risks. *Agronomy*, 15(5), 1131. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051131>

Bouttier-Figueroa, D. C., et al. (2023). Síntesis de nanopartículas metálicas usando extractos naturales de plantas: mecanismos y aplicaciones. *Biotecnia*.

Bundschuh, M., Seitz, F., Rosenfeldt, R. R., & Schulz, R. (2018). Effects of nanoparticles in freshwaters: Risks, mechanisms and knowledge gaps. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37(5), 1235–1250.

Carvalho, M. E. A., et al. (2022). Plant extracts in agriculture and their applications in the agro-food sector. *CAB Reviews*, 17, 1–16. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR202117028>

Cornelis, G., Hund-Rinke, K., Kuhlbusch, T., van den Brink, N., & Nickel, C. (2014). Fate and bioavailability of engineered nanoparticles in soils: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(24), 2720-2764.

Dávila Costa, J. S., & Romero, C. M. (2025). Nano-biofungicides and bio-nanofungicides: State of the art of innovative tools for controlling resistant phytopathogens. *Biophysica*, 5(2), 15. <https://doi.org/10.3390/biophysica5020015>

Fernández, V., & Eichert, T. (2009). Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: Current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(1-2), 36-68. <https://doi.org/10.1080/07352680902743069>

Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*, 4, 20. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>

Ghosh, S., Solanki, R., Bhatia, D., & Sankaranarayanan, S. (2025). Nanomaterials for delivery of medicinal plant extracts and phytochemicals: Potential applications and future perspectives. *Plant Nano Biology*, 12, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2025.100161>

Godlewska-Róža, K., & Ronga, D. (2021). Plant extracts: Importance in sustainable agriculture. *Scientia Horticulturae*, 289, 110442. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110442>

Gupta, M., et al. (2023). Plant essential oils as biopesticides: Advances, challenges and prospects. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1178519. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1178519>

Guzmán-Robayo, N. M. (2023). *Nanoencapsulación: usos y aplicaciones en alimentos y agricultura*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Han, M., et al. (2024). Plant extracts as biostimulant agents: A promising strategy for crop production under stress conditions. *Scientia Horticulturae*, 322, 112271. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112271>

Hernández-Bolaños, P., et al. (2025). Medicinal and aromatic plants as green alternatives for sustainable agriculture. *Environmental Sustainability*, 8, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00187-7>

Islam, S., et al. (2025). Toxicity and transport of nanoparticles in agriculture: Effects on soil health, crop productivity and food safety. *Frontiers in Nanotechnology*, 7, 1622228. <https://doi.org/10.3389/fnano.2025.1622228>

Izuafa, A., Chimbekujwo, K. I., Raji, R. O., Oyewole, O. A., Oyewale, R. O., & Abioye, O. P. (2025). Application of nanoparticles for targeted management of pests, pathogens and disease of plants. *Plant Nano Biology*, 13, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2025.100177>

Jayaraj, G., Balasubramaniam, M., Raju, K. (2025). Nanoencapsulation of Agricultural Inputs. In: Al-Khayri, J.M., Anju, T.R., Jain, S.M. (eds) *Nanotechnology Applications in Modern Agriculture*. *Nanotechnology in Plant Sciences*, vol 3. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90506-3_3

Kah, M., & Hofmann, T. (2014). Nanopesticide research: Current trends and future priorities. *Environment International*, 63, 224-235. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.015>

Kah, M., Tufenkji, N., & White, J. C. (2019). Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature nanotechnology*, 14(6), 532–540. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0439-5>

Kah, M., Beulke, S., Tiede, K., & Hofmann, T. (2013). Nanopesticides: State of knowledge, environmental fate and exposure modelling. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(16), 1823–1867.

Kapustová, M., Granata, G., Napoli, E., Puškárová, A., Bučková, M., Pangallo, D., & Geraci, C. (2021). Nanoencapsulated Essential Oils with Enhanced Antifungal Activity for Potential Application on Agri-Food, Material and Environmental Fields. *Antibiotics*, 10(1), 31. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10010031>

Kariyanna, B., & Sowjanya, M. (2025). Unravelling the use of nanotechnology for crop pest management as a green and sustainable agriculture. *Journal of Basic and Applied Zoology*, 86, 51. <https://doi.org/10.1186/s41936-025-00459-0>

Mendes, R., de Freitas Melo, G., & Barcelos, J. (2023). Regulatory challenges for nanotechnology-based agrochemicals in Latin America. *Journal of Environmental Management*, 336, 117651.

Mishra, S., Keswani, C., Abhilash, P. C., Fraceto, L. F., & Singh, H. B. (2022). Integrated approach of agri-nanotechnology: Challenges and future prospects. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(6), 8209–8236. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15905-7>

Nuruzzaman, M., Rahman, M. M., Liu, Y., & Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: A new window for safe application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(7), 1447–1483. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05214>

Ortega-Cerrilla, M. E., et al. (2017). Micro y nanoencapsulación en sistemas biológicos y agrícolas. *Revista Agroproductividad*.

Pagano, M. (2025). Advancements in agricultural nanotechnology. *Plants*, 14(18), 2939. <https://doi.org/10.3390/plants14182939>

Pateiro, M., Gómez, B., Munekata, P. E. S., Barba, F. J., Putnik, P., Kovačević, D. B., & Lorenzo, J. M. (2021). Nanoencapsulation of Promising Bioactive Compounds to Improve Their Absorption, Stability, Functionality and the Appearance of the Final Food Products. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(6), 1547. <https://doi.org/10.3390/molecules26061547>

Pérez-de-Luque, A., & Hermosín, M. C. (2013). Nanotechnology and its use in agriculture. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(4), 847–866. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013114-4844>

Peixoto, M. et al. (2023). Environmental risks of nanomaterials in agriculture: Gaps and future directions. *Science of the Total Environment*, 856, 159–184.

Prasad, R., et al. (2017). Nanotechnology in sustainable agriculture: Prospects and challenges. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1014.

Sabourin, V., Foladori, G., & González, M. (2022). Nanoagroquímicos en América Latina: Situación regulatoria y desafíos. *Tecnociencia*, 24(2), 45–62.

Safta, D. A., Bogdan, C., & Moldovan, M. L. (2022). Vesicular Nanocarriers for Phytocompounds in Wound Care: Preparation and Characterization. *Pharmaceutics*, 14(5), 991. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14050991>

Scorza, F. A. (2023). Pesticide exposure and human health: Toxic legacy. *Environmental Health Review*, 17(2), 89–110.

Servin, A. D., & White, J. C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Next steps for understanding engineered nanoparticle exposure and risk. *NanoImpact*, 1, 9–12.

Shekhar, C., et al. (2024). A systematic review of pesticide exposure and associated risks to human health. *Journal of Environmental Toxicology*, 18(4), 201–223.

Singh, R., Kumar, V., & Kumar, A. (2023). Ecotoxicological implications of nanopesticides: A review. *Chemosphere*, 320, 138061.

Suteu, D. (2020). Challenges of utilization of vegetal extracts as natural plant protection products. *Applied Sciences*, 10(24), 8913.
<https://doi.org/10.3390/app10248913>

Usman, M., Farooq, M., & Wakeel, A. (2020). Nanoparticles in plant systems: Uptake, translocation, accumulation and implications for agriculture. *Environmental Science: Nano*, 7(6), 1536–1548.

Vega-Vásquez, W., et al. (2020). Nanoencapsulation technologies for agricultural applications. *Journal of Controlled Release*, 328, 732–756.