

Nanopartículas metálicas con actividad antimicrobiana obtenidas a partir de hongos endófitos: una revisión sistemática de la literatura científica

Metallic Nanoparticles with Antimicrobial Activity Obtained from Endophytic Fungi: A Systematic Review of the Scientific Literature

María Alejandra de la Rosa David ^{ab}, Yulis Rossi Arroyo ^{ac}, Luisa Fernanda Estrada García ^{ad}, Luisa María Múnера Porras ^{ae}

^a Grupo de Investigación en Salud y Sostenibilidad, Escuela de Microbiología, Universidad de Antioquia, Colombia

^b maria.delarosa2@udea.edu.co | <https://orcid.org/0009-0004-6901-298X>

^c yulis.rossi@udea.edu.co | <https://orcid.org/0009-0009-5624-1616>

^d luisa.estradag@udea.edu.co | <https://orcid.org/0009-0008-8841-8511>

^e luisam.munera@udea.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-0215-9993>

Citation: de la Rosa David, M. A., Rossi Arroyo, Y., Estrada García, L. F., Múnera Porras, L. M. (2026). Nanopartículas metálicas con actividad antimicrobiana obtenidas a partir de hongos endófitos: una revisión sistemática de la literatura científica. *Mutis*, 16(1), 1-15.
<https://doi.org/10.21789/22561498.2177>

Recibido: 21 de julio de 2025

Aceptado: 5 de noviembre de 2025

Copyright: © 2026 por los autores.

Licenciado para *Mutis*. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

RESUMEN

La revisión sistemática analizó la literatura científica publicada entre 2014 y 2024 sobre nanopartículas metálicas sintetizadas por hongos endófitos y su potencial aplicación en el control de microorganismos patógenos. El proceso de búsqueda se desarrolló siguiendo el protocolo PRISMA 2020 en las bases de datos ScienceDirect, Scopus y Springer Nature Link, además de Google Scholar, aplicando criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Se identificaron 82 estudios relevantes, con India y Egipto como los países con mayor producción investigativa. Las nanopartículas de plata fueron las más reportadas (65 %), predominando las de morfología esférica (83.3 %), las cuales presentaron actividad antimicrobiana destacada frente a *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Klebsiella pneumoniae*. Entre los hongos empleados para su síntesis sobresalieron *Aspergillus terreus* y *Aspergillus niger*. Los hallazgos evidencian la diversidad de hongos utilizados en la obtención de estas nanopartículas y confirman a la plata como el metal de mayor preferencia, así como la morfología esférica como la forma dominante, aspectos relevantes para orientar futuros desarrollos y aplicaciones en el control de patógenos.

Palabras clave: Hongos endófitos; miconanopartículas; nanomateriales; nanopartículas metálicas; resistencia a antibióticos; ciencias naturales.

ABSTRACT

This study presents a systematic review of scientific literature published between 2014 and 2024 on metallic nanoparticles synthesized by endophytic fungi and their potential application in the control of pathogenic microorganisms. The search process followed the PRISMA 2020 protocol and included the databases ScienceDirect, Scopus, and Springer Nature Link databases, as well as Google Scholar. Predefined inclusion and exclusion criteria were applied. Eighty-two relevant studies were identified, with India and Egypt being the countries with the highest research output. Silver nanoparticles were the most frequently reported (65%), with spherical nanoparticles predominating (83.3%). These nanoparticles exhibited significant

antimicrobial activity against *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Klebsiella pneumoniae*. Among the fungal genera used for nanoparticles synthesis, *Aspergillus terreus* and *Aspergillus niger* were the most prominent. Overall, the findings highlight the taxonomic diversity of fungi employed in nanoparticles biosynthesis and confirm silver as the preferred metal and spherical structures as the dominant morphology—key aspects that may inform future developments and applications in pathogen control.

Keywords: Endophytic fungi; Myconanoparticles; Nanomaterials; Metallic nanoparticles; Antibiotic resistance; Natural sciences.

INTRODUCCIÓN

La resistencia antimicrobiana (RAM) se ha convertido en un grave problema de salud pública debido al uso indiscriminado de antibióticos, especialmente de amplio espectro, lo que reduce la eficacia de los tratamientos (Okeke *et al.*, 2023). En 2019, más de 1,2 millones de personas murieron por infecciones causadas por bacterias resistentes a antibióticos (Murray *et al.*, 2022). Además, se estima que la RAM causa 700 mil muertes anuales y podría alcanzar 10 millones para 2050 (O'Neill, 2016). A la par, el crecimiento poblacional ha incrementado la presión sobre la producción de alimentos, la cual se ha visto amenazada por fitopatógenos (Ruffo-Roberto *et al.*, 2019). Aunque los agroquímicos han sido utilizados para combatir estas infecciones, su uso excesivo también genera resistencia y deja residuos químicos perjudiciales (Barbhuiya *et al.*, 2022). Ante esta problemática, es crucial buscar enfoques alternativos más seguros y efectivos para prevenir y tratar enfermedades causadas por bacterias y hongos resistentes (Pansambal *et al.*, 2023).

Las nanopartículas metálicas (NPm) producidas por hongos endófitos emergen como una solución prometedora debido a su actividad antimicrobiana (Rehman *et al.*, 2023). Las nanopartículas (NP) son nanomateriales con un tamaño entre 1 y 100 nm, que presentan propiedades únicas como una alta relación superficie-volumen, lo que mejora su reactividad, actividad catalítica y potencial biológico (Sangeetha *et al.*, 2019). Si bien existen métodos físicos y químicos para su producción, la síntesis biológica es más amigable con el ambiente (Okeke *et al.*, 2023). Por su parte, los hongos endófitos son microorganismos que pasan la mayor parte de su ciclo de vida colonizando los tejidos internos de las plantas mediante una asociación costo-beneficio, sin causar síntomas patológicos (Sánchez-Fernández *et al.*, 2013), destacando entre otras especies de hongos en términos de la cantidad y actividad de los metabolitos producidos que reducen los iones metálicos a NPm (Nassar *et al.*, 2023). Las funciones biológicas de las NPm producidas por estos hongos, han sido previamente documentadas (Saunu *et al.*, 2024); por ejemplo, las AgNP han sido investigadas ampliamente debido a su acción antimicrobiana de amplio espectro, con interrupciones mínimas en células humanas (Ahmed *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2022). Análogamente se informaron los efectos antibacterianos de las CuNP y AgNp, utilizando cepas de *Escherichia coli* y *Bacillus subtilis*, en donde las CuNP demostraron una actividad antibacteriana superior en comparación con las AgNp, mostrando notables ventajas sobre agentes químicos antimicrobianos de origen fúngico como los azoles, los cuales no solo promueven la resistencia al fármaco, sino que además están asociados con crecientes efectos

secundarios, direccionando las investigaciones hacia la aplicación de otros materiales como las NP (Ghasemian *et al.*, 2012). Similarmente las SeNP y ZnONP han demostrado efectos inhibidores sobre varios fitopatógenos, como *Aspergillus flavus*, *A. brasiliensis*, *Alternaria alternata*, *Fusarium oxysporum* y *Rhizoctonia solani*, suprimiendo eficazmente su crecimiento al impedir la germinación de esporas y disminuir el grosor de las hifas, convirtiéndolas en una opción prometedora para los agroquímicos ecológicos basados en NP (Gunti *et al.*, 2019; Sumanth *et al.*, 2020).

Considerando entonces el potencial de los hongos endófitos en la producción de NPm, es pertinente recopilar la información publicada alrededor de los mecanismos de biosíntesis, actividad antimicrobiana y aplicaciones prácticas para futuras investigaciones en nanotecnología verde, ya que actualmente no hay una revisión sistemática o estudio compilatorio específicamente de hongos endófitos con dicha utilidad teniendo en cuenta sus ventajas fisiológicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estrategia de búsqueda

La revisión sistemática se realizó siguiendo las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, 2020; Fuentes-Canosa, 2022). Se efectuó una búsqueda exhaustiva en las bases de datos ScienceDirect, Scopus, Springer Nature Link y el motor de búsqueda Google Scholar. La estrategia de búsqueda integró descriptores DeCS/MeSH y AGROVOC, junto con términos libres, combinados mediante operadores booleanos. Esto aseguró sensibilidad, especificidad y exhaustividad, incluyendo literatura gris relacionada con la síntesis de NPm mediadas por hongos endófitos.

La ecuación general de búsqueda fue la siguiente: "*endophytic fungi*" AND ("*metallic nanoparticles*" OR "*metal nanoparticles*" OR "*myconanoparticles*" OR "*nanomaterials*"). Se estableció un período de búsqueda entre 2014 y 2024 para incluir estudios recientes sobre el tema. Los resultados obtenidos fueron gestionados con Zotero, herramienta que facilitó la eliminación de duplicados.

Proceso de búsqueda y recolección de datos

Los registros recuperados mediante la ecuación de búsqueda fueron almacenados y ordenados en Microsoft Excel, previa eliminación de duplicados en el referenciador Zotero (versión 7). Los criterios de inclusión consideraron artículos originales en inglés publicados en los últimos 10 años, que identificaran la especie de hongo endófito y evaluaran la actividad antimicrobiana de las NPm producidas. Se excluyeron estudios que no cumplieran estos parámetros.

Para garantizar la reproducibilidad del proceso, tres revisores aplicaron de manera independiente la estrategia de búsqueda y los criterios de inclusión. Las discrepancias en la selección de estudios fueron resueltas por consenso o, en caso necesario, mediante la intervención de un cuarto revisor.

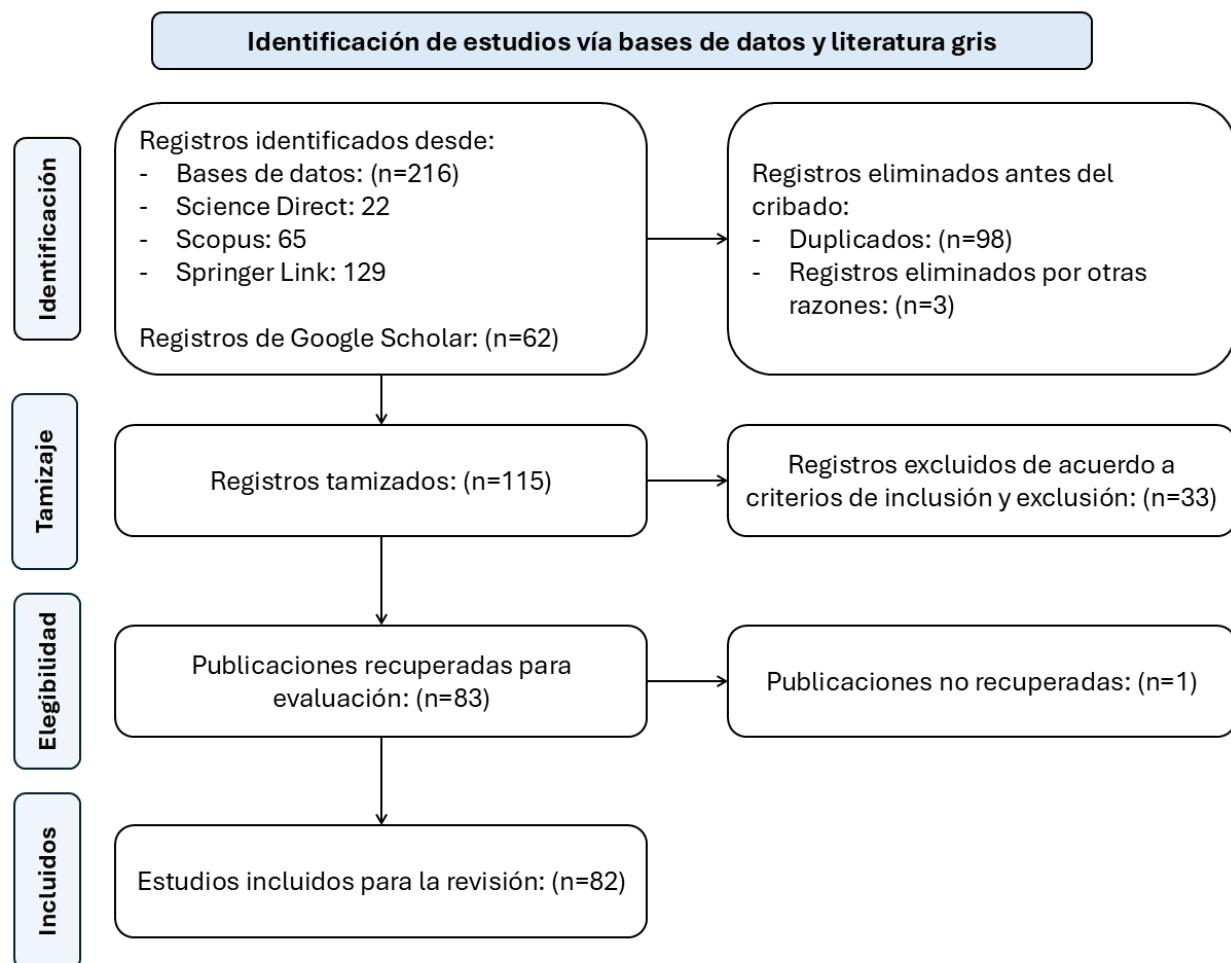
Análisis de datos

Se extrajo información relevante sobre la taxonomía de los hongos endófitos, así como las propiedades fisicoquímicas y la actividad antimicrobiana de las NPm. Los hallazgos se resumieron mediante un análisis descriptivo, mientras que los gráficos se elaboraron utilizando herramientas como Mapchart (versión 2024), Copyicon (versión 2020).

RESULTADOS

Se identificaron 278 artículos mediante el protocolo de búsqueda (ScienceDirect: 22; Scopus: 65; Springer Nature Link: 129; Google Scholar: 62). Tras eliminar 98 duplicados, se evaluaron 216 publicaciones según título y resumen, descartándose 101 por no cumplir los criterios de inclusión. Finalmente, se analizaron 115 artículos, de los cuales 33 fueron excluidos, resultando en 82 estudios seleccionados para la revisión sistemática (Figura 1).

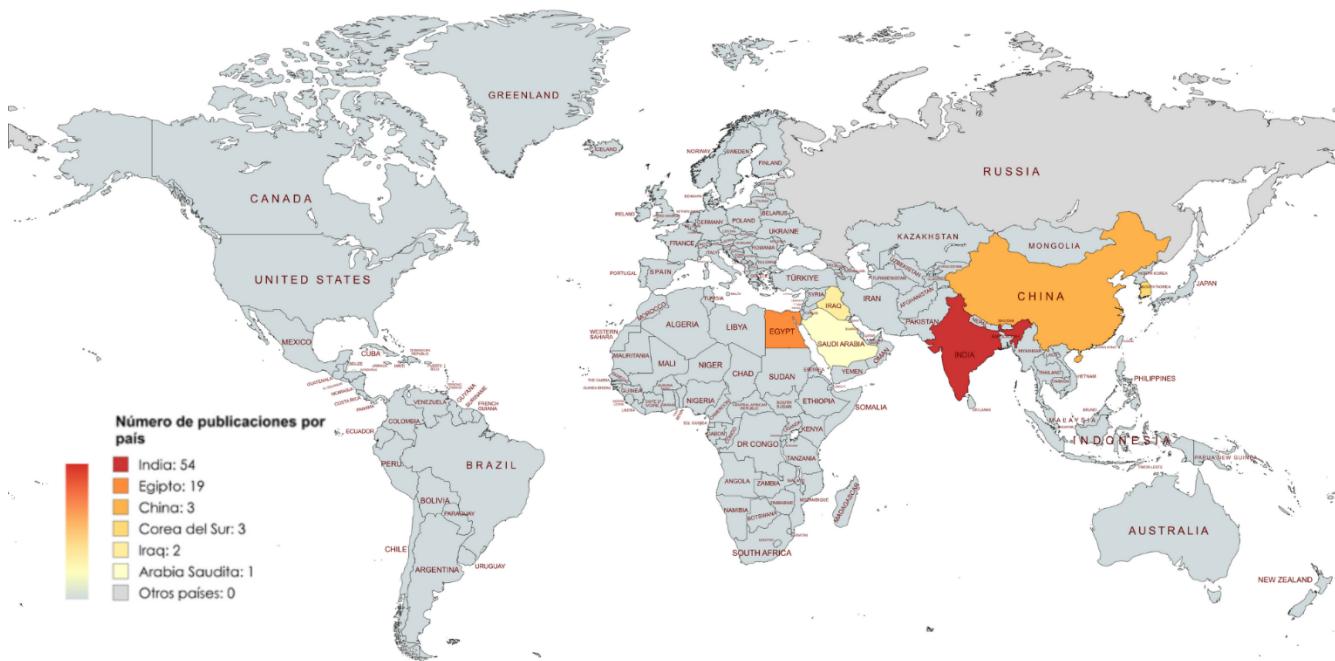
Figura 1. Diagrama de flujo del protocolo de búsqueda para la revisión sistemática.



Fuente. Adaptada de Protocolo PRISMA (2020).

Los 82 artículos proceden de seis países (Figura 2), liderando la producción científica India (54) y Egipto (19), seguidos de Corea del Sur (3) y China (3), Irak (2) y Arabia Saudita (1). La concentración en Asia y África refleja un interés prioritario en estas regiones, vinculado a su infraestructura y recursos científicos.

Figura 2. País de origen de estudios analizados en la revisión sistemática.

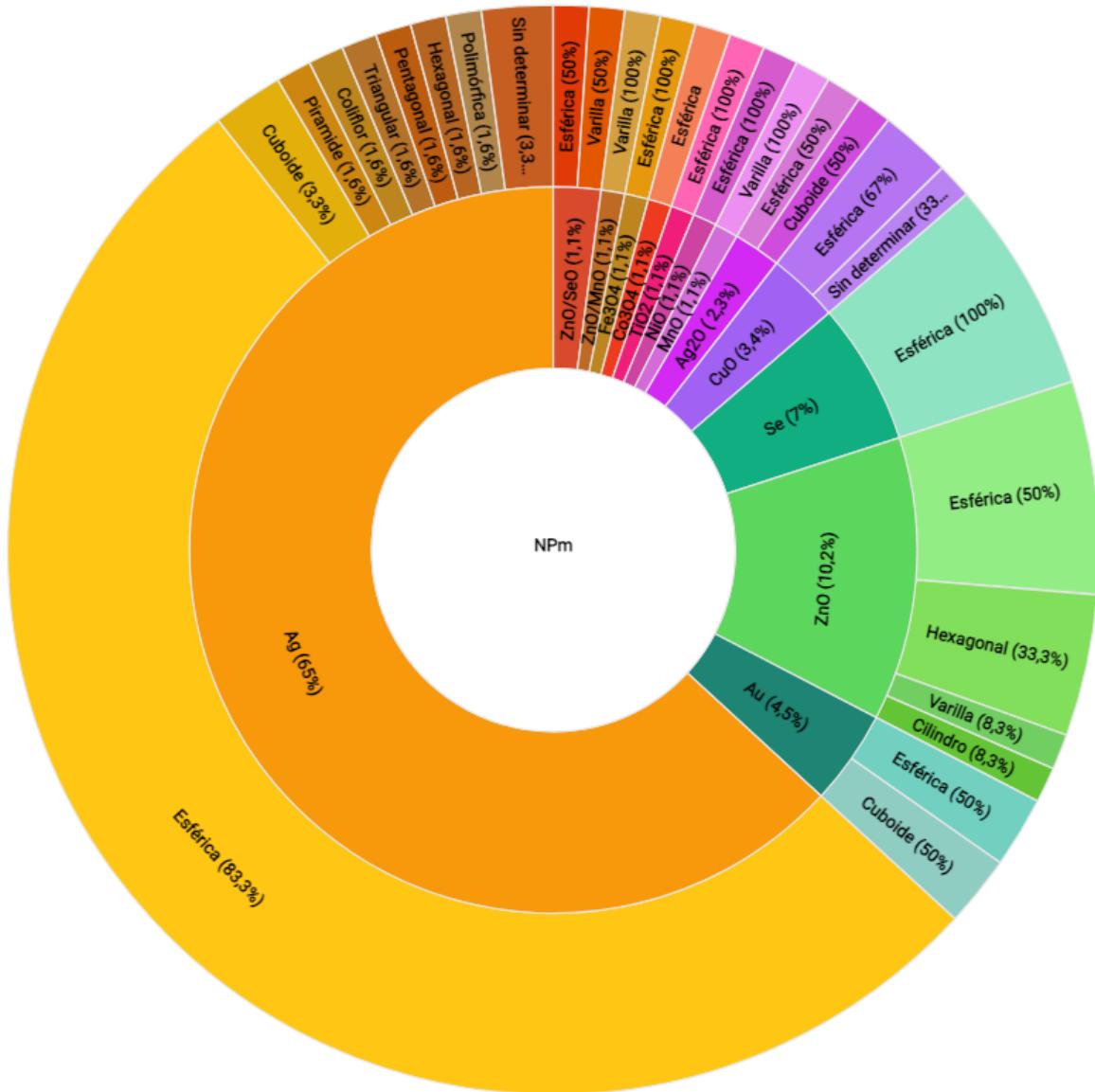


Fuente. Elaboración propia en Mapchart.

La Tabla 1 (ver anexo) resume los estudios revisados sobre la producción de NPM por diversas especies de hongos. Entre 2014 y 2024, las especies más reportadas fueron *Aspergillus terreus* y *A. niger*. El hongo *A. terreus* destacó por producir diversas NPM (AgNP, ZnONP, CuONP, entre otras), mientras que *A. niger* fue notable por su capacidad de producir AgNP y ZnONP. Otras especies menos reportadas incluyen *Penicillium sclerotiorum*, *Trichoderma viride* y *Fusarium chlamydosporum*.

La Figura 3 muestra las NPM fúngicas reportadas y sus formas predominantes. Las AgNP constituyen el 65% de las NPM estudiadas, posicionando este metal como el más empleado en la síntesis de NP antimicrobianas a partir de hongos endófitos. Las ZnONP representan el 10,2%, mientras que las SeNP y AuNP alcanzan el 7 y 4,5 %, respectivamente.

Figura 3. Morfología más frecuente de las NPm fúngicas en los artículos revisados.



AgNP	Nanopartícula de plata	CuONP	Nanopartícula de cobre	Ag2ONP	Nanopartícula de óxido de plata	Fe3O4NP	Nanopartícula de óxido de hierro(II,III)
AuNP	Nanopartícula de oro	MnONP	Nanopartícula de óxido de manganeso	SeNP	Nanopartícula de selenio	Co3O4NP	Nanopartícula de óxido de cobalto(II,III)
ZnONP	Nanopartícula de óxido de zinc	TiO2NP	Nanopartícula de óxido de titanio	NiONP	Nanopartícula de óxido de níquel	ZnO/SeONP	Nanopartícula de aleación de óxido de zinc y óxido de selenio

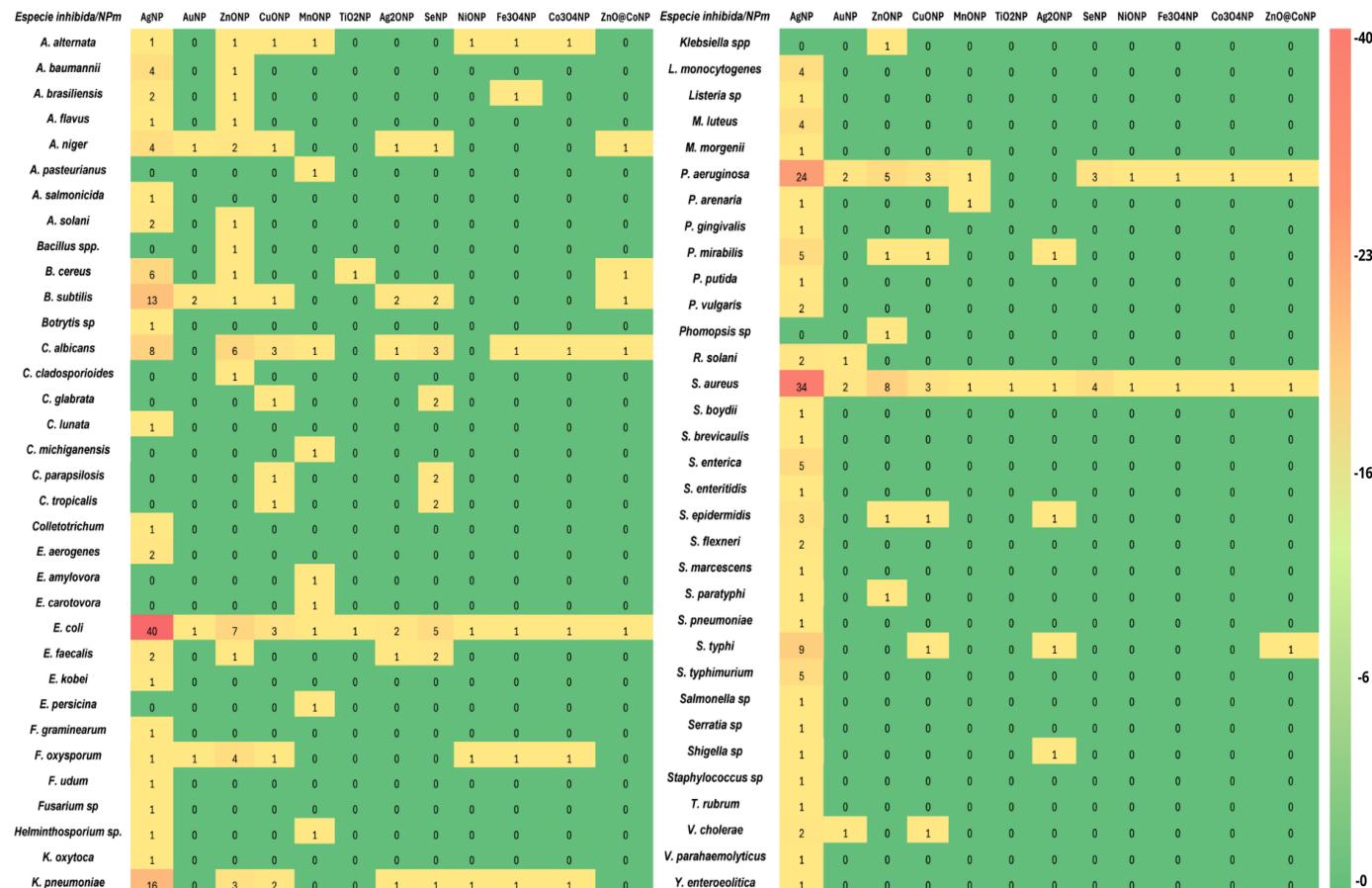
Fuente. Elaboración propia en Copiyicon.

En cuanto a la morfología, las NP esféricas predominan en un 83,3 % para las AgNP y en un 100 % para las NP de Se y NiO. La forma de varilla es común en las MnONP y ZnO/MnONP (100 %). También se identificaron formas hexagonales, cúbicas, polimórficas, aunque en porcentajes menores (Figura 3).

La Tabla 2 presenta los 68 microorganismos evaluados (bacterias, hongos y levaduras) que fueron inhibidos por 13 tipos de NPm (Ag, Au, ZnO, CuO, MnO, TiO₂, Ag₂O, Se, NiO, Fe₃O₄, Co₃O₄, ZnO/SeO y ZnO/MnO). Esta tabla presenta un mapa de calor (*heat-table*) en el que los colores varían de verde (menor cantidad de estudios) a rojo (mayor cantidad de estudios). La escala de la derecha representa la frecuencia relativa de reportes para cada combinación de nanopartícula y microorganismo.

Entre las especies más evaluadas, destaca *E. coli*, con inhibición por AgNP en 39 estudios, seguida de *Staphylococcus aureus* (33), *Pseudomonas aeruginosa* (24) y *Klebsiella pneumoniae* (16).

Tabla 2. Distribución de estudios según la inhibición de especies por NPm.



Fuente. Elaboración propia.

DISCUSIÓN

La resistencia antimicrobiana (RAM) constituye una de las mayores amenazas para la salud pública global, favorecida por la movilidad humana, el comercio internacional y el uso indiscriminado de antibióticos en salud, agricultura y ganadería (Yu *et al.*, 2021). Según la Organización Mundial de la Salud (oms, 2024), este fenómeno se traduce en un incremento sostenido de la morbilidad y mortalidad asociada a infecciones resistentes. Regiones como África Subsahariana y el sur de Asia concentran las tasas más altas, con 99 y 77 muertes por cada 100 000 habitantes, respectivamente (Murray *et al.*, 2022). En consecuencia, países como China, India, Egipto, Arabia Saudita, Irak y Corea del Sur han liderado la investigación sobre la RAM, impulsados por la alta carga de infecciones, el uso inapropiado de antimicrobianos y la necesidad de soluciones biotecnológicas innovadoras (oms, 2024).

En esta revisión sistemática se encontró que India y Egipto contribuyen con cerca del 89 % de las publicaciones analizadas, lo cual evidencia no solo la magnitud del problema, sino también el papel protagónico de estas naciones en el desarrollo de alternativas frente a la RAM (Murray *et al.*, 2022). En India, el empleo excesivo de antibióticos tanto en medicina humana como en producción agrícola ha generado una presión selectiva significativa sobre los microorganismos (O'Neill, 2016). Egipto enfrenta una situación similar, agravada por el acceso limitado a medicamentos de calidad y a tratamientos adecuados (Abdel-Hafez *et al.*, 2016). Este panorama refleja una realidad compartida en países de ingresos medios donde la regulación farmacéutica y la educación sanitaria resultan aún insuficientes.

Frente a esta crisis, emergen enfoques sostenibles como la producción de nanopartículas metálicas (NPm) mediante hongos endófitos, considerados sistemas biológicos eficientes para la biosíntesis de materiales con actividad antimicrobiana (Bhattacharjee *et al.*, 2017). Estos hongos poseen la capacidad de secretar enzimas reductoras y metabolitos secundarios que transforman iones metálicos en nanopartículas estables a nanoscala (Sánchez-Fernández *et al.*, 2013). Este proceso, propio de la denominada “nanotecnología verde”, ofrece ventajas frente a los métodos fisicoquímicos tradicionales por su menor impacto ambiental, menor costo y condiciones operativas más suaves.

Los resultados evidenciaron que las AgNP constituyen el tipo más frecuente de NPm, representando el 65 % de las reportadas en la literatura (Figura 3). Su amplio uso se relaciona con su alta actividad antimicrobiana frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas, entre ellas *E. coli*, *S. aureus*, *P. aeruginosa* y *K. pneumoniae* (Mwakalesi, 2023), microorganismos responsables de infecciones hospitalarias persistentes y de elevada letalidad (Abdelkader *et al.*, 2022). Diversos estudios han confirmado también su acción sobre biopelículas bacterianas, estructuras altamente resistentes a los tratamientos convencionales (Rai *et al.*, 2021), y su efectividad contra hongos fitopatógenos que afectan cultivos agrícolas (Husain *et al.*, 2023).

El mecanismo de acción de las AgNP se asocia principalmente con la liberación de iones de plata, que interactúan con grupos tiol en proteínas y enzimas, generando

radicales libres que alteran la integridad celular (Akther *et al.*, 2021). Además, se ha determinado que su eficacia depende del tamaño y la forma de las nanopartículas: las de menor tamaño (<10 nm) pueden penetrar la membrana e interactuar directamente con el ADN, produciendo daños genéticos y detención del ciclo celular (Rai *et al.*, 2021). Por su parte, las nanopartículas con morfología cúbica o en forma de barra presentan mayor capacidad de disruptión celular por sus extremos afilados (Sumanth *et al.*, 2020). Estos resultados confirman que las propiedades fisicoquímicas estructurales son determinantes en la bioactividad antimicrobiana de las AgNP y abren la puerta a la optimización morfológica en procesos de biosíntesis controlada.

Junto con las AgNP, esta revisión identificó otras nanopartículas de interés, como las ZnONP (10,2%) y SeNP (7%), las cuales exhiben actividad antibacteriana y antifúngica atribuida a sus propiedades eléctricas, ópticas y a su alta reactividad superficial (Kumar *et al.*, 2022). Su efecto inhibitorio se ha documentado frente a patógenos vegetales como *Alternaria alternata*, *Aspergillus brasiliensis*, *Fusarium oxysporum*, *Botrytis cinerea* y *Rhizoctonia solani* (Sumanth *et al.*, 2020), evidenciando su potencial aplicación en manejo de enfermedades agrícolas. En esta línea, Parisi *et al.* (2015) y Rico *et al.* (2015) destacan la utilidad de las NPm en sistemas de diagnóstico molecular miniaturizados, que permiten la detección rápida de fitopatógenos, reduciendo el uso de agroquímicos y promoviendo la agricultura sostenible. Ray *et al.*, (2023) complementan que estas estrategias minimizan la presión selectiva sobre microorganismos benéficos y disminuyen el impacto ambiental de los pesticidas convencionales.

La diversidad de hongos endófitos descrita en los estudios revisados (85 especies) respalda su papel como biofactorías naturales de NPm. Entre ellos, destacan *A. terreus* y *A. niger*, especies ampliamente distribuidas, con rápido crecimiento en medios simples como Agar Papa Dextrosa (PDA) y elevada capacidad de producción de metabolitos secundarios (El-Hawary *et al.*, 2020). Esta versatilidad metabólica no solo favorece la biosíntesis de nanopartículas, sino que también sugiere posibles aplicaciones complementarias en la obtención de compuestos bioactivos para usos farmacéuticos y agrícolas. En particular, los hongos endófitos, por su relación simbiótica con las plantas, representan una fuente sostenible de biomoléculas que contribuyen tanto a la protección vegetal como al desarrollo de nanomateriales de interés industrial.

Los hallazgos de esta revisión revelan una tendencia creciente hacia la convergencia entre nanotecnología y agricultura. De los 82 estudios analizados, 18 evaluaron la eficacia de NPm frente a patógenos vegetales, destacando géneros como *Aspergillus*, *Fusarium* y *Alternaria* (Tabla 2). Este aspecto cobra especial relevancia en países como India, donde la agricultura representa el 18 % del PIB y la producción de cereales (arroz, trigo y maíz) ocupa el tercer lugar a nivel mundial (FAO, 2023; Madhusudhan, 2015). Dado que estos cultivos son altamente vulnerables a agentes bióticos (Pandey *et al.*, 2023), las NPm sintetizadas por hongos endófitos surgen como una alternativa viable para fortalecer la bioseguridad alimentaria y reducir la dependencia de insumos químicos.

En conjunto, los resultados comparativos de esta revisión sistemática confirman que las nanopartículas metálicas biosintetizadas por hongos endófitos constituyen una estrategia promisoria frente a la RAM y los desafíos fitosanitarios. Su alta eficacia antimicrobiana, la posibilidad de producción sostenible y su versatilidad funcional las posicionan como herramientas biotecnológicas clave para la transición hacia enfoques de salud y agricultura sostenibles. No obstante, persisten vacíos relacionados con la estandarización de los métodos de síntesis y caracterización, así como con la evaluación de su toxicidad y biodegradabilidad, aspectos cruciales para garantizar su uso seguro a escala industrial y ambiental.

Finalmente, este trabajo aporta una síntesis crítica y comparativa de la evidencia reciente, destacando tres contribuciones principales: (i) la sistematización del conocimiento sobre hongos endófitos como productores de NPm con potencial antimicrobiano; (ii) la identificación de las propiedades estructurales (tamaño y forma) como determinantes clave de su eficacia; y (iii) la articulación entre nanotecnología verde, mitigación de la RAM y sostenibilidad agrícola. Estos aportes reafirman el papel de la biotecnología fúngica como un eje estratégico en el desarrollo de soluciones innovadoras y seguras para el control microbiano y la protección ambiental.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta revisión sistemática confirman la amplia diversidad de hongos endófitos capaces de sintetizar nanopartículas metálicas (NPm) con potencial antimicrobiano, destacándose *A. terreus* y *A. niger* como especies predominantes. Entre los metales analizados, la plata se consolidó como el de mayor uso y eficacia, mientras que la morfología esférica de las nanopartículas fue la más frecuente, características que se asocian con una mayor estabilidad coloidal y una interacción más eficiente con las estructuras microbianas. Estos hallazgos constituyen una base sólida para el diseño racional de futuras investigaciones orientadas a optimizar las propiedades estructurales y funcionales de las NPm para su aplicación en el control de patógenos de relevancia clínica y agrícola.

La evidencia recopilada también muestra una marcada concentración geográfica de la producción científica, principalmente en India y Egipto, lo que plantea limitaciones para la extrapolación global de los resultados. Esta distribución desigual evidencia la necesidad de promover estudios comparativos en diferentes contextos ecológicos y taxonómicos, que consideren la variabilidad en las condiciones de cultivo, la especie fúngica y los factores ambientales, todos ellos determinantes en la síntesis y funcionalidad de las NPm.

Asimismo, deben reconocerse posibles sesgos de publicación, dado que los estudios con resultados positivos tienden a tener mayor visibilidad, lo que podría sobreestimar la eficacia reportada de las NPm. De igual modo, la falta de estandarización metodológica —en variables como la concentración metálica, el pH, la fuente de carbono o los métodos de caracterización— limita la reproducibilidad y la comparación entre estudios. En consecuencia, la consolidación de protocolos homogéneos de síntesis, purificación y evaluación biológica constituye un requisito indispensable para avanzar hacia su aplicación segura a escala industrial.

Finalmente, aunque las nanopartículas metálicas fúngicas emergen como una alternativa sostenible y de amplio espectro frente a la resistencia antimicrobiana y los fitopatógenos, su implementación práctica exige investigaciones adicionales que evalúen su toxicidad, biodegradabilidad y efectos ecotoxicológicos. Solo mediante la integración de enfoques interdisciplinarios —entre la micología aplicada, la nanotecnología verde y la microbiología ambiental— será posible trasladar estos avances al desarrollo de bioproductos efectivos, seguros y ambientalmente responsables.

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declararon no tener conflicto de intereses

REFERENCIAS

- Abdel-Hafez, S. I., Nafady, N. A., & Abdel-Rahim, I. R. (2016). Assessment of protein silver nanoparticles toxicity against pathogenic *Alternaria solani*. *3 Biotech*, 6, 199. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0515-6>
- Abdelkader, D. H., Negm, W. A., Elekhnawy, E., Eliwa, D., Aldosari, B. N., & Almurshed, A. S. (2022). Zinc oxide nanoparticles as potential delivery carrier: Green synthesis by *Aspergillus niger* endophytic fungus, characterization, and in vitro/in vivo antibacterial activity. *Pharmaceuticals*, 15(9), 1057. <https://doi.org/10.3390/ph15091057>
- Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2016). A review on plant extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise. *Journal of Advanced Research*, 7(1), 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.02.007>
- Akther, T., Ranjani, S., & Hemalatha, S. (2021). Nanoparticles engineered from endophytic fungi (*Botryosphaeria rhodina*) against ESBL-producing pathogenic multidrug-resistant *E. coli*. *Environmental Sciences Europe*, 33, 83. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00524-9>
- Barbhuiya, R. I., Tinoco-Nevarez, N., Ramalingam, S., Elsayed, A., Subramanian, J., Routray, W., et al. (2022). A review of nanoparticle synthesis and application in the suppression of diseases in fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(14), 4477–4499. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2142511>
- Bhattacharjee, S., Debnath, G., Das, A. R., Saha, A. K., & Das, P. (2017). Characterization of silver nanoparticles synthesized using an endophytic fungus, *Penicillium oxalicum* having potential antimicrobial activity. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 8(4), 045008. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/aa8ba2>
- El-Hawary, S. S., Moawad, A. S., Bahr, H. S., Abdelmohsen, U. R., & Mohammed, R. (2020). Natural product diversity from the endophytic fungi of the genus *Aspergillus*. *RSC Advances*, 10, 22058–22079. <https://doi.org/10.1039/DORA04290K>

Fuentes-Canosa, A. (2022). Reseña de sitio web: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Declaración PRISMA 2020. *Revista de Estudios e Investigación en Psicología y Educación*, 9(2), 323–327. <https://doi.org/10.17979/reipe.2022.9.2.9368>

Ghasemian, E., Naghoni, A., Tabaraie, B., & Tabaraie, T. (2012). In vitro susceptibility of filamentous fungi to copper nanoparticles assessed by rapid XTT colorimetry and agar dilution method. *Journal de Mycologie Médicale*, 22(4), 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2012.09.006>

Gunti, L., Dass, R. S., & Kalagatur, N. K. (2019). Phytofabrication of selenium nanoparticles from *Emblica officinalis* fruit extract and exploring its biopotential applications: Antioxidant, antimicrobial, and biocompatibility. *Frontiers in Microbiology*, 10, 391. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00931>

Husain, S., Nandi, A., Simnani, F. Z., Saha, U., Ghosh, A., Sinha, A., et al. (2023). Emerging trends in advanced translational applications of silver nanoparticles: A progressing dawn of nanotechnology. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(1), 47. <https://doi.org/10.3390/jfb14010047>

Kumar, A., Choudhary, A., Kaur, H., Guha, S., Mehta, S., & Husen, A. (2022). Potential applications of engineered nanoparticles in plant disease management: A critical update. *Chemosphere*, 295, 133798. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133798>

Madhusudhan, L. (2015). Agriculture role on Indian economy. *Business and Economics Journal*, 6(4), 1. <https://www.hilarispublisher.com/open-access/agriculture-role-on-indian-economy-2151-6219-1000176.pdf>

Mahendra Rai, M., Bonde, S., Golinska, P., Trzcińska-Wencel, J., Gade, A., Abd-Elsalam, K. A., et al. (2021). *Fusarium* as a novel fungus for the synthesis of nanoparticles: Mechanism and applications. *Journal of Fungi*, 7(2), 139. <https://doi.org/10.3390/jof7020139>

Murray, C., Shunji-Ikuta, K., Sharara, F., Swetschinski, L., Robles-Aguilar, G., Gray, A., et al. (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: A systematic analysis. *The Lancet*, 399(10325), 629–655. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0)

Mwakalesi, J. (2023). Green synthesis of silver nanoparticles using aqueous extract of *Vachellia xanthophloea* and their potential use for antibacterial and sensing of mercury ions. *Plasmonics*, 18, 2077–2090. <https://doi.org/10.1007/s11468-023-01909-7>

Nassar, A. R., Eid, A. M., Atta, H. M., et al. (2023). Exploring the antimicrobial, antioxidant, anticancer, biocompatibility, and larvicidal activities of selenium nanoparticles fabricated by endophytic fungal strain *Penicillium verhagenii*. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35360-9>

O'Neill, J. (2016). *Tackling drug-resistant infections globally: Final report and recommendations*. The Review on Antimicrobial Resistance. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20173071720>

Okeke, E. S., Nweze, E. J., Anaduaka, E. G., Okoye, C. O., Anosike, C. A., Joshua, P. E., Ezeorba, T. C., et al. (2023). Plant-derived nanomaterials (PDNM): A review on pharmacological potentials against pathogenic microbes, antimicrobial resistance (AMR), and some metabolic diseases. *3 Biotech*, *13*, 291. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03713-w>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *World cereal production*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

Organización Mundial de la Salud. (2024, 28 de mayo). *77.ª Asamblea Mundial de la Salud A77/A/CONF./1: Punto 11.8 del orden del día. Resistencia a los antimicrobianos: Acelerar las respuestas nacionales y mundiales*. <https://www.paho.org/es/documentos/eb154conf7-resistencia-antimicrobianos-acelerar-respuestas-nacionales-mundiales>

Pandey, A. K., Samota, M. K., Kumar, A., Silva, A. S., & Dubey, N. K. (2023). Fungal mycotoxins in food commodities: Present status and future concerns. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *7*, 1162595. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1162595>

Pansambal, S., Oza, R., Borgave, S., Chauhan, A., Bardapurkar, P., Vyas, S., et al. (2023). Bioengineered cerium oxide (CeO_2) nanoparticles and their diverse applications: A review. *Applied Nanoscience*, *13*, 6067–6092. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02574-8>

Parisi, C., Vigani, M., & Rodríguez-Cerezo, E. (2015). Agricultural nanotechnologies: What are the current possibilities? *Nano Today*, *10*(2), 124–127. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2014.09.009>

Ray, M. K., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Chakrabartty, I., Kungwani, N. A., et al. (2023). Nanotechnology as a promising tool against phytopathogens: A futuristic approach to agriculture. *Agriculture*, *13*(9), 1856. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091856>

Rehman, A. U., Tabassum, A., Aftab, A., Zahid, N., Jamal, A., Sajini, A. A., et al. (2023). *Artemisia vulgaris* reduced and stabilized titanium oxide nanoparticles for anti-microbial, anti-fungal and anti-cancer activity. *Applied Nanoscience*, *13*, 6165–6175. <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02859-6>

Rico, C. M., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2015). Chemistry and biochemistry of nanoparticles, and their role in the antioxidant defense system in plants. En M. H. Siddiqui, M. H. Al-Whaibi, & F. Mohammad (Eds.), *Nanotechnology and plant sciences: Nanoparticles and their impact on plants* (pp. 1–17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14502-0_1

Ruffo-Roberto, S., Youssef, K., Farghily-Hashim, A., & Ippolito, A. (2019). Nanomaterials as alternative control means against postharvest diseases in fruit crops. *Nanomaterials*, *9*(12), 1752. <https://doi.org/10.3390/nano9121752>

Saanu, B., Mary, O., Stell, M., Adeyinka, O., Pelumi, O., Emmanuel, A., et al. (2024). Biosynthesis of nanoparticles using microorganisms: A focus on endophytic fungi. *Helion*, *10*(21), e39636. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39636>

María Alejandra de la Rosa David, Yulis Rossi Arroyo, Luisa Fernanda Estrada García, Luisa María Múnera Porras (2026).
<https://doi.org/10.21789/22561498.2177>

Sánchez-Fernández, R. E., Sánchez-Ortiz, B. L., Sandoval-Espinoza, Y. K. M. S., Ulloa-Benítez, Á., Armendáriz-Guillén, B., & García-Méndez, M. C., et al. (2013). Hongos endófitos: Fuente potencial de metabolitos secundarios bioactivos con utilidad en agricultura y medicina. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 16(2), 132–146. [https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(13\)72084-9](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(13)72084-9)

Sangeetha, J., Mundaragi, A., Thangadurai, D., Maxim, S. S., Pandhari, R. M., & Alabhai, J. M. (2019). Nanobiotechnology for agricultural productivity, food security, and environmental sustainability. En D. Panpatte & Y. Jhala (Eds.), *Nanotechnology for agriculture: Crop production & protection*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9374-8_1

Sumanth, B., Lakshmeesha, T. R., Ansari, M. A., Alzohairy, M. A., Udayashankar, A. C., Shobha, B., et al. (2020). Mycogenic synthesis of extracellular zinc oxide nanoparticles from *Xylaria acuta* and its nanoantibiotic potential. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 8519–8536. <https://doi.org/10.2147/IJN.S271743>

Yu, H., Han, X., & Quiñones Pérez, D. (2021). La humanidad enfrenta un desastre: la resistencia antimicrobiana. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 20(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2021000300020&lng=es&tlng=es

Anexo

Nanopartículas metálicas con actividad antimicrobiana obtenidas a partir de hongos endófitos: una revisión sistemática de la literatura científica

Metal nanoparticles with antimicrobial activity obtained from endophytic fungi: a systematic review

María Alejandra de la Rosa David ^{ab}, Yulis Rossi Arroyo ^{ac}, Luisa Fernanda Estrada García ^{ad}, Luisa María Múnera Porras ^{ae}

^a Grupo de Investigación en Salud y Sostenibilidad, Escuela de Microbiología,
Universidad de Antioquia, Colombia

^b maria.delarosa2@udea.edu.co | <https://orcid.org/0009-0004-6901-298X>

^c yulis.rossi@udea.edu.co | <https://orcid.org/0009-0009-5624-1616>

^d luisa.estradag@udea.edu.co | <https://orcid.org/0009-0008-8841-8511>

^e luisam.munera@udea.edu.co | <https://orcid.org/0000-0002-0215-9993>

Tabla 1. Artículos analizados en la revisión sistemática donde se relacionan las publicaciones con el tipo de hongo y NPM obtenida.

Autor	Año	Especie de hongo	Tipo de NPM	Revista
Ranjani, S., Kathun, U. R., & Hemalatha, S.	2021	<i>Penicillium sclerotiorum</i>	AgNP	Applied Biochemistry and Biotechnology
Sales, T. J., Clarence, P. P., Lalitha, L. J., et al.	2018	<i>Fusarium solani</i>	P-AgNP	Biophysics (Russian Federation)
Sathiyaseelan, A., et al.	2022	<i>Paraconiothyrium brasiliense</i>	TiO2	Environmental Research
Radhika, C., et al.	2020	<i>Colletotrichum incarnatum</i>	AgNP	Frontiers in Bioengineering and Biotechnology
Kaur, T., Bala, M., Kumar, G., et al.	2022	<i>Trichoderma viride</i>	ZnONP	Archives of Microbiology
Mishra, R. C., et al.	2022	<i>Aspergillus terreus</i>	AuNP	Materials
M, G., DJ, M., Vinaykiya, V. et al	2022	<i>Alternaria alternata</i>	AgNP	BioNanoScience
Ranjani, S., et al.	2022	<i>Colletotrichum siamense</i>	AgNP	LWT
Vellingiri, M. M., Ashwin, J. K. M., Soundari, A. J. P. G., et al.	2021	<i>Aspergillus terreus</i>	Ag2ONP	Molecular Biology Reports
Kumar, A., et al.	2021	<i>Colletotrichum plurivorum</i>	Ag2ONP	Colloids and Surfaces B: Biointerfaces
Mani, V. M., et al.	2021	<i>Aspergillus terreus</i>	CuONP	Environmental Research
Mousa, S. A., El-Sayed, E. S. R., Mohamed, S. S., et al.	2021	<i>Aspergillus terreus</i>	Co3O4NP	
			CuONP	
			Fe3O4NP	Applied Microbiology and Biotechnology
			NiONP	
Gond, S. K., Mishra, A., Verma, S. K., et al.	2020	<i>Phomopsis helianthi</i>	ZnONP	
			AgNP	Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological
Abdelhakim, H.K., El-Sayed, E.R., & Rashidi, F.B.	2020	<i>Alternaria tenuissima</i>	ZnONP	Journal of Applied Microbiology
Sumanth, B., et al.	2020	<i>Xylaria acuta</i>	ZnONP	International Journal of Nanomedicine

Abdel-Azeem, A., et al.	2020	<i>Trichoderma atroviride</i>	AgNP	Journal of Renewable Materials
Neethu, S., et al.	2020	<i>Penicillium polonicum</i>	AgNP	Microbial Pathogenesis
Hulikere, M. M., & Joshi, C. G.	2019	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	AgNP	Process Biochemistry
Akther, T., & Hemalatha, S.	2019	<i>Setosphaeria rostrata</i>	AgNP	BioNanoScience
Hu, X., et al.	2019	<i>Talaromyces purpureogenus</i>	AgNP	International Journal of Nanomedicine
Neethu, S., Midhun, S. J., Radhakrishnan, E. K., et al.	2018	<i>Penicillium polonicum</i>	AgNP	Microbial Pathogenesis
Hammad, S. E., El-Rouby, M. N., Abdel-Aziz, M. M., et al.	2023	<i>Fusarium chlamydosporum</i>	ZnONP AuNP	Biomass Conversion and Biorefinery
Nanda, N., S, R., & S, H.	2023	<i>Lasiodiplodia theobromae</i>	AgNP	Applied Biochemistry and Biotechnology
Kathija, N., Ranjani, S., & Hemalatha, S.	2023	<i>Lasiodiplodia theobromae</i>	AgNP	BioNanoScience
Janarthanan, S., Ranjani, S., & Hemalatha, S.	2023	<i>Aspergillus niger</i>	AgNP	Applied Biochemistry and Biotechnology
Manjunatha, D., et al.	2023	<i>Metapochonia suchlasporia</i>	AgNP	BioNanoScience
Manjunatha, D., et al.	2023	<i>Phyllosticta owaniiana</i>	AgNP	Archives of Microbiology
Akther, T., Ranjani, S., & Hemalatha, S.	2021	<i>Botryosphaeria rhodina</i>	AgNP	Environmental Sciences Europe
Fouda, A., et al.	2022	<i>Penicillium crustosum</i>	SeNP	Scientific Reports
Islam, S. N., et al.	2022	<i>Fusarium oxysporum</i>	SeNP	3 Biotech
EL-Moslamy, S. H., et al.	2023	<i>Trichoderma virens</i>	MnONP	Scientific Reports
EL-Moslamy, S., et al.	2017	<i>Trichoderma harzianum</i>	AgNP	Scientific Reports

Abdel-Hafez, S. I. I., Nafady, N. A., & Abdel-Rahim, I. R.	2016	<i>Alternaria solani</i>	AgNP	3 Biotech
Devi, L. S., & Joshi, S. R.	2014	<i>Cryptosporiopsis ericae</i>	AgNP	Journal of Microbiology
Nassar, A. R. A., et al.	2023	<i>Penicillium verhagenii</i>	SeNP	Scientific Reports
Hussein, H. G., et al.	2022	<i>Aspergillus quadrilineatus, Aspergillus ochraceus,</i>	SeNP	AMB Express
EL-Moslamy, S. H., Abd-Elhamid, A. I., & Fawal, G. E.	2024	<i>Clonostachys rosea</i>	ZnO/MnONP	Scientific Reports
EL-Zawawy, N. A., et al.	2023	<i>Aspergillus flavipes</i>	AgNP	Microbial Cell Factories
Nassar, A. R. A., et al.	2023	<i>Aspergillus terreus</i>	CuONP	BMC Complementary Medicine and Therapies
Singh, A., Jaiswal, S. K., Prakash, R., et al.	2024	<i>Nigrospora guilinensis</i>	SeNP	Journal of Cluster Science
EL-Moslamy, S. H., Rezk, A. H., Elkady, M. F., et al.	2024	<i>Streptomyces coelicolor</i>	ZnONP MnONP	Arabian Journal for Science and Engineering
Anwar, M. M., Aly, S. S. H., Nasr, E. H., et al.	2022	<i>Alternaria tenuissima</i>	ZnONP	AMB Express
Qanash, H., et al.	2023	<i>Alternaria alternata</i>	ZnO/SeONP	Biomass Conversion and Biorefinery
Mistry, H., et al.	2020	<i>Aspergillus brunneoviolaceus</i>	AgNP	Biotechnology Letters
Lin, P., et al.	2020	<i>Eurotium cristatum</i>	AgNP	Biotechnology and Bioprocess Engineering
Bagur, H., et al.	2020	<i>Exserohilum rostrata</i>	AgNP	Journal of Cluster Science
Netala, V. R., et al.	2016	<i>Aspergillus versicolor</i>	AgNP	3 Biotech
Muhsin, T. M., & Hachim, A. K.	2014	<i>Nigrospora sphaerica</i>	AgNP	World Journal of Microbiology and Biotechnology
Andrade F, Jenipher C, Gurav N, et al.	2024	<i>Colletotrichum siamense</i>	AgNP	Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials

Singh A, Dey P, Mihara H, et al.	2024	<i>Nigrospora guilinensis</i>	SeNP	Biomass Conversion and Biorefinery
Nongthombam KS, Kannaiah S, Raju P, et al.	2024	<i>Neocosmospora solani</i>	AgNP	Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials
Najeer Ahamed, M. J., Soundharajan, R., & Srinivasan, Vaijayanthi, S., Ranjani, S., & Hemalatha, S.	2023	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	AgNP	Microbial Pathogenesis
	2023	<i>Colletotrichum siamense</i>	AgNP	Journal of Environmental Chemical Engineering
Prabu Kumar, S., et al.	2018	<i>Phomopsis liquidambaris</i>	AgNP	Biocatalysis and Agricultural Biotechnology
Hulikere, M. M., et al.	2017	<i>Cladosporium cladosporides</i>	AuNP	Process Biochemistry
Vijayan, S., et al.	2016	<i>Fusarium oxysporum</i>	AgNP	Journal of Bionanoscience
Bhattacharjee, S., et al.	2017	<i>Penicillium oxalicum</i>	AgNP	Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology
Neethu, S., et al.	2018	<i>Penicillium polonicum</i>	AgNP	Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology
Balakumaran, M. D., Ramachandran, R., &	2015	<i>Guignardia mangiferae</i>	AgNP	Microbiological Research
Pant, M., et al.	2024	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	AgNP	RSC Advances
Wen, L., et al.	2016	<i>Penicillium spinulosum</i>	AgNP	International Journal of Nanomedicine
Dinesh, B., et al.	2021	<i>Penicillium cinnamopurpureum</i>	AgNP	Spectroscopy Letters
Ranjani, S., et al.	2021	<i>Lasiodiplodia pseudosetheobromae</i>	AgNP	Inorganic and Nano-Metal Chemistry
Naveen, K. V., et al.	2021	<i>Penicillium radiatolobatum</i>	AgNP	Inorganic Chemistry Communications
Mohamed, N. H., et al.	2019	<i>Penicillium chrysogenum, Aspergillus fumigatus</i> y	AgNP	Microbiology Society
Ramalingmam, P., Muthukrishnan, S., & Thangaraj,	2015	<i>Curvularia lunata</i>	AgNP	Journal of Nanoscience and Nanoengineering
Andrade, F., et al.	2024	<i>Phyllosticta capitalensis</i>	AgNP	Journal of Drug Delivery Science and Technology

Rajput, K., et al.	2017	<i>Pestalotiopsis versicolor</i>	AgNP	Kavaka
II, S., Hafez, A., et al.	2016	<i>Epicoccum nigrum</i>	AgNP	Journal of Pharmaceutical and Applied Chemistry
Netala, V. R., et al.	2015	<i>Aspergillus niger</i>	AgNP	Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research
Abdelkader, D. H., et al.	2022	<i>Aspergillus niger</i>	ZnONP	Pharmaceuticals
Halkai, K. R., et al.	2017	<i>Fusarium semitecum</i>	AgNP	Journal of Clinical and Diagnostic Research
Ranjani, S., & Hemalatha, S.	2021	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	AgNP	Research Square
Hemashekhar, B., et al.	2017	<i>Aspergillus niger</i>	AgNP	Journal of Engineering Research and Application
Choong, V., Ai, L. O. G., & Suan, T. K.	2017	<i>Podosordaria muli y Xylaria feejeensis.</i>	AgNP	Materials Today: Proceedings
Sharma, A., et al.	2022	<i>Talaromyces purpureogenus</i>	AgNP	Micro and Nano Systems Letters
Kumar, A., et al.	2021	<i>Colletotrichum plurivorum</i>	AgNP AuNP	Colloids and Surfaces B: Biointerfaces
Dinesh, B., et al.	2021	<i>Aspergillus aureoles</i>	AgNP	Analytical Chemistry
Muhsin, T., & Hachim, A.	2016	<i>Papulaspora palidula</i>	AgNP	American Journal of Bioengineering and Biotechnology
Lavanya, N., et al.	2023	<i>Xylaria arbuscula</i>	ZnONP	Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology
Manjunath, H., & Chandrashekhar, G.	2019	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	AgNP	Process Biochemistry
Monga, I, M., et al.	2023	<i>Aspergillus terreus y Aspergillus flavus</i>	AgNP	Microbial Biosystem