

Análisis espectroscópico y efecto antifúngico de nanopartículas de plata sintetizadas con extracto acuoso de lúpulo *Humulus lupulus* L.

Spectroscopic analysis and antifungal effect of silver nanoparticles synthesized with aqueous extract of hops *Humulus lupulus* L.

Ulin Antobelli Basilio-Cortes¹, Alexis Alejandro Salazar-Navarro¹, Dagoberto Duran-Hernández¹,

José Gregorio Joya-Dávila¹, Henry López-López¹, Lourdes González-Salitre^{1*}

¹ Área Académica de Biotecnología, Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, CP. 21705, Mexicali, Baja California, México. Tel. +52 (686) 523-00-79/88.

antobelli.basilio@uabc.edu.mx, alexis.salazar@uabc.edu.mx, ddurn@uabc.edu.mx, jose.joya@uabc.edu.mx, henry.lopez.lopez@uabc.edu.mx, gonzalez.lourdes@uabc.edu.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Fusarium oxysporum;
Alternaria solani;
antifúngico; FTIR;
DLS.

La síntesis verde de nanopartículas de plata (AgNPs) es un área de oportunidad rápida y económica. En este estudio se analizó la síntesis de nanopartículas de sulfato de plata (AgSNPs) y nanopartículas de nitrato de plata (AgNNPs) utilizando extracto acuoso de lúpulo. Las AgNPs obtenidas fueron caracterizadas mediante métodos instrumentales espectroscópicos. Se evaluó la actividad antifúngica contra *Fusarium oxysporum* y *Alternaria solani*. La presencia de AgNPs se evidenció por Uv-Vis en rangos de 200 nm a 350 nm. En FTIR se observaron picos entre 1000 cm⁻¹ a 1200 cm⁻¹ relacionados con la vibración de estiramiento del doble enlace C-C y C-O. El tamaño de partícula mostró comportamientos bimodales. En potencial ζ , las AgNPs presentaron valores entre 13.79 mV a -57.53 mV. Se presentó actividad antifúngica con una disminución en los halos de crecimientos. Estas AgNPs sintetizadas con extracto de lúpulo puede ser una alternativa versátil antifúngica.

Abstract

Keywords:

Fusarium oxysporum;
Alternaria solani;
antifungal; FTIR; DLS.

The green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) is a fast and cost-effective area of opportunity. In this study, the synthesis of silver sulfate nanoparticles (AgSNPs) and silver nitrate nanoparticles (AgNNPs) was analyzed using an aqueous hop extract. The resulting AgNPs were characterized using instrumental spectroscopic methods. Antifungal activity against *Fusarium oxysporum* and *Alternaria solani* was evaluated. The presence of AgNPs was detected by UV-Vis spectroscopy in the 200 nm to 350 nm range. FTIR spectroscopy revealed peaks between 1000 cm⁻¹ and 1200 cm⁻¹ related to the stretching vibration of the C-C and C-O double bonds. Particle size exhibited bimodal behavior. The ζ potential of the AgNPs ranged from 13.79 mV to -57.53 mV. Antifungal activity was observed, with a reduction in growth halos. These AgNPs synthesized with hop extract may be a versatile antifungal alternative.

Recibido: 19 de noviembre de 2025

Aceptado: 19 de mayo de 2026

Publicado: 23 de septiembre de 2026

Cómo citar: Basilio-Cortes, U. A.; Salazar-Navarro, A. A.; Duran-Hernández, D.; Joya-Dávila, J. G.; López-López, H.; & González-Salitre, L. (2026). Análisis espectroscópico y efecto antifúngico de nanopartículas de plata sintetizadas con extracto acuoso de lúpulo *Humulus lupulus* L. *Acta Universitaria*, 36(NE-1), e4955. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2026.4955>

Introducción

La nanotecnología es un importante campo de estudio para generar nanopartículas con tamaños de 1 nm a 100 nm. Por su parte, las nanopartículas (NP) tienen la capacidad de utilizarse en diversos campos, como la medicina, la ingeniería y la agricultura, debido a sus múltiples funcionalidades físicas, químicas, térmicas, mecánicas, catalíticas, eléctricas, ópticas, entre otras (Elmusa *et al.*, 2021). Además, las NP han sido estudiadas y reportadas en numerosos trabajos de investigación por sus propiedades benéficas y por su fácil obtención (Jeevanandam *et al.*, 2018), mientras que las NP sintetizadas a partir de distintos iones metálicos como plata, oro, platino, etc., se han presentado como nanopartículas metálicas de gran importancia debido a sus propiedades antimicrobianas (Zayed *et al.*, 2019).

Recientemente, las nanopartículas de plata (AgNPs) se han considerado un agente importante en distintas disciplinas. Entre los diversos usos de las AgNPs se incluyen la catálisis y la biodetección de actividad antibacteriana (Das *et al.*, 2022). De todas estas aplicaciones, las actividades antimicrobianas —específicamente en hongos patógenos de las AgNPs— han sido una alternativa viable.

Las AgNPs se producen principalmente mediante la reducción de sales de plata, como el tetrafluoroborato de plata (AgBF_4), el nitrato de plata (AgNO_3) y el perclorato de plata (AgClO_4). La N,N-dimetilformamida (DMF), el hidrógeno elemental, el ácido ascórbico, el citrato de sodio, el borohidruro de sodio (NaBH_4), el tioglicerol de borohidruro, el 2-mercaptoetanol y el reactivo de Tollens, son algunos ejemplos de agentes reductores. Su función principal es donar electrones a los iones de plata (Ag^+) presentes en una solución (sal), transformándolos en plata metálica de valencia cero (Ag^0), la cual posteriormente se nuclea para formar las nanopartículas (Malik *et al.*, 2024; Zehra *et al.*, 2025).

Las AgNPs han atraído considerable atención por sus propiedades antifúngicas contra un amplio espectro de microorganismos como *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum*, *Cladosporium cladosporioides*, *Cladosporium fulvum*, *Alternaria alternata*, *Botryosphaeria dothidea*, *Diaporthe actinidiae*, *Phomopsis microspora* y *Ustilagoidea virens* (Khan *et al.*, 2023).

Entre los mecanismos de acción de las AgNPs destaca la alteración de la pared celular, donde estas se unen a las paredes de los patógenos, causando daño estructural y aumentando la permeabilidad, originando lisis celular. También, en la interacción con el ADN, los iones de plata de las nanopartículas penetran en las células patógenas, condensan el ADN y reaccionan con los grupos tiol de las proteínas, alterando las funciones celulares y provocando muerte celular. Adicionalmente, las AgNPs inhiben y destruyen biopelículas bacterianas mediante la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) que degradan la matriz extracelular y dañan el ADN, superando las limitaciones de los antibióticos convencionales. (Carotenuto *et al.*, 2013; Kyaw *et al.*, 2017; Romero-Urbina *et al.*, 2015).

Algunas técnicas para la síntesis de nanopartículas metálicas —como métodos químicos, físicos, descomposición térmica, fotorreducción en micelas inversas, microondas, irradiación gamma, ablación láser, entre otras— son costosas e implican el uso de sustancias químicas tóxicas y no amigables con el medio ambiente (Xiao *et al.*, 2025). En consecuencia, la necesidad de una técnica alternativa que sea capaz de superar estos desafíos ha impulsado una nueva área de investigación sobre síntesis verde, siendo respetuosa con el medio ambiente, rentable y ecológica (Albrahim *et al.*, 2025).

Una alternativa para la producción biológica de nanopartículas de plata es desarrollar la síntesis verde a partir de extractos de plantas, pues es un método práctico, rápido, fácil, eficiente, viable y ecológico. Los metabolitos secundarios de las plantas ayudan a reducir los iones de plata a NP, debido a que estas especies vegetales poseen fitoquímicos específicos que permiten dicha síntesis. Los compuestos fitoquímicos actúan como agentes estabilizadores en la síntesis verde de las AgNPs mediante la cobertura superficial para evitar la aglomeración de las partículas y controlar su tamaño y forma. Este proceso forma parte de la síntesis donde los fitoconstituyentes estabilizan las nanopartículas recién formadas mediante interacciones químicas (Deka *et al.*, 2025).

Por otro lado, los lúpulos son las flores —también llamadas conos o estróbilos— de la planta *Humulus lupulus* L. originaria de climas templados. El principal uso del lúpulo es proporcionar amargor y aroma a la cerveza; sin embargo, por sus atributos, también es utilizada para fines de investigación debido a la presencia de sus componentes fitoquímicos, tales como polifenoles, aceites esenciales, ácidos α (cohumulona, humulona, adhumulona), ácidos β (lupulonas, colupulona, adlupulona) y los principales volátiles del lúpulo como el metilo octanoato, germacreno B, β -mircene, geraniol, linalool, trans- α -bergamotene, α -cubebene, cariofileno, cis- β -farneseno, α -humuleno, β -selineno y β -citronelol, entre otros terpenoides (González-Salitre *et al.*, 2023). Cabe mencionar que se le atribuyen propiedades antibacterianas, antifúngicas, antibióticas, antioxidantes, cicatrizantes, antiinflamatorias y antivirales (Sun *et al.*, 2025).

La caracterización de NP requiere un enfoque multidisciplinario para determinar tamaño, morfología y composición empleando técnicas como: microscopio electrónico de transmisión (MET), microscopía electrónica de barrido (MEB), microscopía de fuerza atómica (MFA), dispersión dinámica de luz (DDL) y difracción de rayos X (DR-X), además del uso de métodos espectroscópicos como; UV-Vis, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (FRX) y análisis de carga superficial (potencial Zeta), a fin de obtener una comprensión integral de las propiedades fisicoquímicas (Titus *et al.*, 2019). Este estudio se basó en la síntesis de AgNPs mediante el método de síntesis verde y la caracterización NP, utilizando extracto acuoso de lúpulo de la variedad Ekuanot®. El objetivo fue evaluar el efecto antifúngico de las AgNPs sintetizadas con extracto de lúpulo contra hongos patógenos y caracterizar las NP obtenidas, mediante análisis espectroscópico FTIR y DLS. Esta contribución integra síntesis verde biotecnológica para su posible aplicación en el sector agropecuario.

Materiales y métodos

Materiales

Se utilizó una variedad de lúpulo americano Ekuanot® Brand HBC 366, en pellets de lúpulo tipo 90 (Yakima Chief Hops, Washington, EUA), lote P91-GUEKU6274, cosecha 2021 de la marca Yakima Hops®. La muestra de lúpulo, según el lote, presenta las siguientes características: α ácidos 12.3%, β ácidos 4.4%, β -pineno 0.4%, mirceno 28.3%, linalol 0.2%, cariofileno 11.6%, farneseno 0.5%, humuleno 20.9%, geraniol 1.2% y otros compuestos 36.9%. Se utilizaron dos variedades de sales para la síntesis verde, el sulfato y el nitrato de plata, adquiridas de Sigma-Aldrich.

Obtención de extracto

El extracto acuoso del lúpulo se obtuvo siguiendo la metodología descrita por Basilio-Cortes *et al.* (2024) con algunas modificaciones. En un recipiente ámbar de 1 L con tapón, se colocaron 100 g de pellets y se agregó 800 ml de agua destilada, dejando la mezcla en maceración durante 3 d. El extracto obtenido se filtró (papel Whatman N° 2) y se concentró en un cristalizador con ayuda de un horno con circulación de aire a una temperatura de 45 °C durante 24 h para eliminar el exceso de agua. El extracto se recuperó en tubos de ensayo con tapa y se almacenó a 8 °C para su posterior análisis.

Síntesis verde

La síntesis verde de AgNPs se realizó con la metodología descrita por Das *et al.* (2022). En tubos de ensayo con tapón, el extracto de lúpulo fue diluido 10 veces y se mezcló con las respectivas sales de sulfato y nitrato de plata, para obtener una concentración final de 10 mM. Se analizaron de forma independiente las NP. Las síntesis de NP se mantuvieron a temperatura ambiente durante 24 h con agitación continua en oscuridad. El color de la solución cambió dependiendo de la sal, indicando la formación de AgNPs. Finalmente, las AgNPs fueron cubiertas con papel aluminio y se reservaron en refrigeración para futuros análisis.

Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros FTIR de las AgNPs se registraron entre 4000 cm^{-1} y 500 cm^{-1} espectrómetro (FTIR, Agilent 4300, Santa Clara, CA, EE. UU.) Los espectros se obtuvieron utilizando el módulo ATR en modo de transmisión. Los datos se suavizaron mediante la función de suavizado automático del *software*, aplicando el algoritmo OriginLab versión 9.0.

Distribución del tamaño de partícula y potencial ζ

La distribución del tamaño de partícula de las AgNPs se determinó mediante difracción láser de dispersión de luz estática (DLS), y la estabilidad electrostática (potencial ζ) de la distribución del tamaño de partícula de las AgNPs se determinó utilizando un difractómetro láser Litesizer 500 de Anton Paar®, Austria.

Actividad antifúngica

Se evaluó el efecto *in vitro* mediante la actividad antifúngica de las AgNPs de lúpulo frente a los hongos fitopatógenos *Fusarium oxysporum* y *Alternaria solani* (microorganismos aislados e identificados de plantas de jitomate infectadas, resultados no mostrados) siguiendo la metodología descrita por Rodrigues *et al.* (2021) con algunas modificaciones. El medio de cultivo se preparó con agar estándar (BD BioxonMT). El medio se esterilizó (121 °C, 0,1 MPa, 15 min) y se vertió en placas de Petri. Una vez solidificado el agar, se añadió independientemente una alícuota de 50 μl de cada AgNPs (10 mM). Posteriormente, se inoculó (con una concentración estandarizada de 1×10^4 esporas/ml para cada microorganismo) en el centro de cada placa de Petri para observar la inhibición sobre la superficie del agar. Las placas se incubaron aeróbicamente a 25 °C durante siete días. Finalmente, se midió periódicamente por siete días el diámetro del fragmento micelar desarrollado durante el crecimiento micelar. Se utilizaron cajas con agar sin AgNPs como control positivo, y como control negativo se utilizó una solución de bactericida-fungicida Curamycin 500 (Sulfato de estreptomicina 2.19% + Clorhidrato de oxitetraciclina 0.23% + Oxicleoruro de cobre 78.52%). Los bioensayos se realizaron por triplicado de manera simultánea.

Análisis estadístico

Todos los resultados fueron analizados con un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA) utilizando el *software* Origin (versión 9.0) con un nivel de confianza del 95%. Es importante resaltar que para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Resultados y discusión

Espectroscopia UV-Vis

La respuesta espectral UV-vis (Figura 1) de las AgSNPs mostraron un pico amplio comprendido en el rango de 200 nm a 350 nm, mientras que las AgNNPs presentaron un pico estrecho bien definido de 200 nm a 250 nm. Esta variación entre los rangos de aparición de síntesis de las AgNPs está relacionada con el tamaño de partícula y la cantidad de compuestos fenólicos provenientes del extracto de lúpulo, lo cual se atribuye a que los electrones libres en las nanopartículas metálicas forman una banda de absorción por resonancia de plasmones superficiales debido a la vibración mutua de los electrones en presencia de luz (Anandalakshmi *et al.*, 2016).

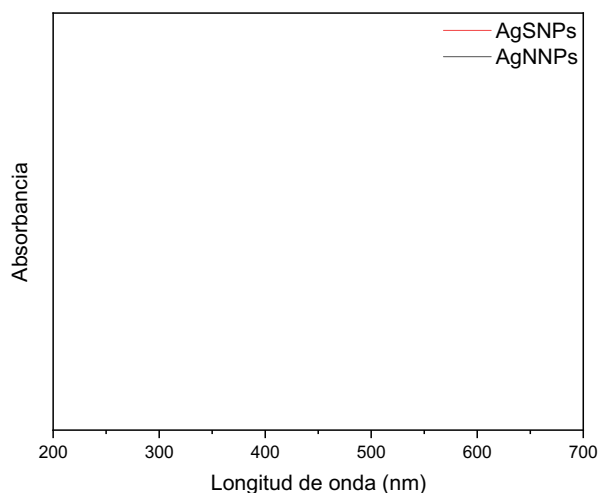


Figura 1. Espectros UV-Vis de las nanopartículas de sulfato de plata (AgSNPs) y las nanopartículas de nitrato de plata (AgNNPs).
Fuente: Elaboración propia.

Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros de FTIR de las nanopartículas de plata sintetizadas con extracto de lúpulo se muestran en la Figura 2. Las AgSNPs mostraron una ligera banda espectral entre 3500 cm^{-1} a 3000 cm^{-1} , evidenciando una menor vibración de estiramiento O-H y un pico observado entre 1000 cm^{-1} a 1200 cm^{-1} , relacionado a la vibración de estiramiento del doble enlace C=C y vibración de estiramiento C-O. Las bandas observadas en este espectro tienen intensidades muy bajas, a lo que se le atribuye una baja estabilización y formación de AgNPs. Sin embargo, en el espectro de las AgNNPs se observaron bandas definidas entre 3500 cm^{-1} a 3000 cm^{-1} atribuidas a la presencia de grupos O-H.

La banda 1600 cm^{-1} se atribuye al estiramiento de C=C, siendo un indicativo de una afinidad de los compuestos bioactivos del lúpulo con el nitrato de plata para formar NP. Estudios como el de Sharma *et al.*

(2018) han reportado que la presencia de estas bandas prominentes indica que el extracto contiene fenólicos, alcaloides y terpenoides adsorbidos en la superficie de las nanopartículas de plata sintetizadas; sin embargo, en este trabajo se evidenció que los compuestos del extracto de lúpulo promueven, en menor cantidad, la formación de NP utilizando sulfato de plata. Este análisis de FTIR señala la importancia de los grupos funcionales para la síntesis verde y la estabilización de nanopartículas de plata.

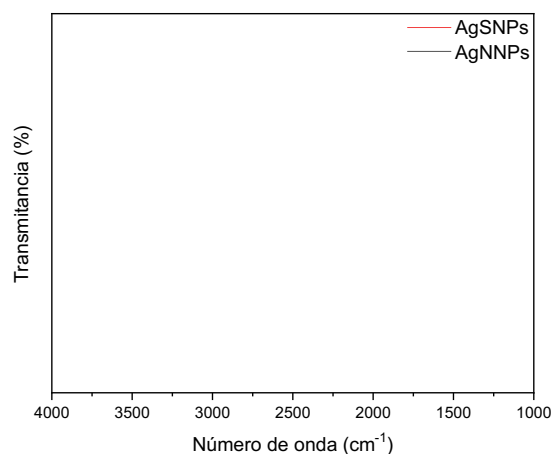


Figura 2. Espectros FTIR de las nanopartículas de sulfato de plata (AgSNPs) y las nanopartículas de nitrato de plata (AgNNPs).

Fuente: Elaboración propia.

Dispersión de luz dinámica (DLS)

En la Figura 3 se presenta la distribución de tamaño de partícula de las AgNPs. El análisis DLS indicó que las AgSNPs y AgNNPs presentaron un tamaño aproximado entre 808.51 nm a 3101.88 nm y 900.74 nm a 8669.30 nm, respectivamente, evidenciando tamaños >100 nm y la presencia de partículas submicrónicas (<1 μm) o micropartículas (1 μm a 1000 μm) (Stack *et al.*, 2019). Ambas NP mostraron un comportamiento bimodal. La formación de las AgNPs en el medio líquido forma una capa de hidrato a su alrededor, la cual también contiene diferentes moléculas o iones del extracto adheridos a su superficie; por lo tanto, el tamaño hidrodinámico siempre es mayor que el tamaño original de la nanopartícula. El aumento de tamaño de partícula en un medio acuoso también puede atribuirse a la aglomeración de las AgNPs, un fenómeno bastante común (Das *et al.*, 2022; Hamelian *et al.*, 2018). En este contexto, se ha informado que el ion de plata (Ag^+) atrapa los compuestos fitoquímicos del extracto en su superficie, y que los polifenoles desempeñan un papel fundamental en la reducción del ion Ag^+ a Ag^0 , formando así núcleos cristalinos de plata. Estos núcleos se acumulan con el tiempo y aumentan de tamaño, dando lugar a la formación de AgNPs (Das *et al.*, 2022).

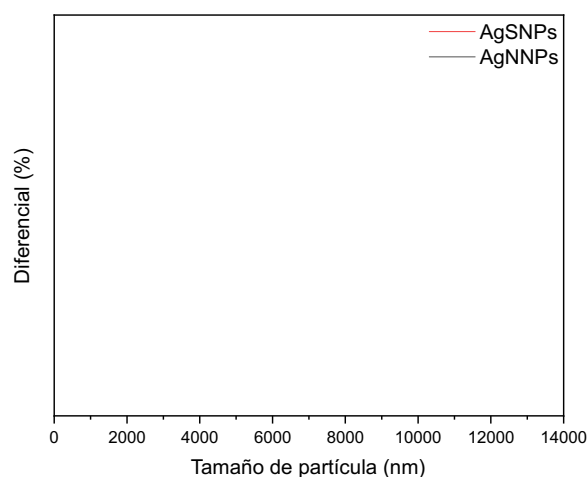


Figura 3. Distribución de tamaño de partícula de nanopartículas de sulfato de plata (AgSNPs) y nanopartículas de nitrato de plata (AgNNPs).
 Fuente: Elaboración propia.

Potencial ζ

Los resultados obtenidos de potencial ζ de las AgNNPs se muestran en la Figura 4. Las AgSNPs y AgNNPs presentaron valores de 13.79 mV y -57.53 mV, una conductividad de 2.92 mS/cm y 3.54 mS/cm y una movilidad electroforética de $0.94 \mu\text{m}^2\text{cm/Vs}$ y $-0.08 \mu\text{m}^2\text{cm/Vs}$, respectivamente, por lo que ambas muestras presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$). Estas variaciones de carga son atribuidas a la composición fitoquímica de la variedad de lúpulo en combinación con la sal ternaria para formar las AgNNPs mediante la síntesis por medio de la interacción molecular con los grupos funcionales del extracto (Das et al., 2022; Jain & Thareja, 2019).

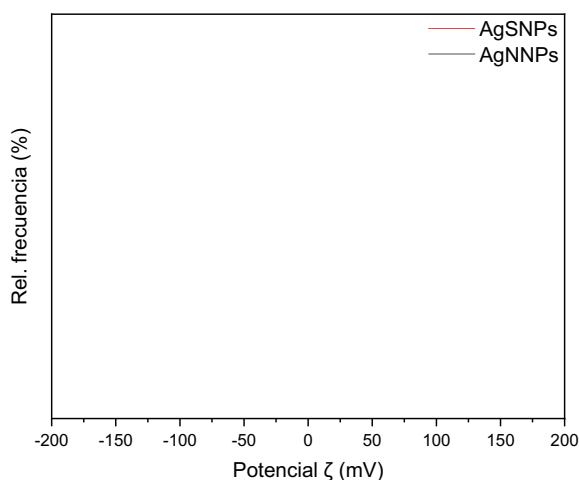


Figura 4. Potencial ζ de nanopartículas de sulfato de plata (AgSNPs) y nanopartículas de nitrato de plata (AgNNPs).
 Fuente: Elaboración propia.

En el estudio realizado por Das *et al.* (2022), sintetizaron AgNPs a partir del extracto etanólico al 40% de lúpulo de la variedad Hallertau, un lúpulo europeo con características (α ácido 5.0%, β ácidos de 5%, Co-Humulona 24%, aceites esencial 1 mL/100g, mirceno 24%, humulona 50%, cariofileno 12,5%, farneseno <1.0%) totalmente diferentes a las de este estudio, evidenciando una carga de $-23,2 \text{ mV} \pm 0.5 \text{ mV}$ e indicando una estabilidad moderada de las AgNNPs. Por ello, en este estudio se evidencia la importancia de la composición fitoquímica del lúpulo (polifenoles, flavonoides, prenilflavonoides, taninos, saponinas entre otros) y la forma de extracción con solventes (etanólico, acuoso) para la formación de AgNPs.

Efecto antifúngico

Los resultados de la actividad antifúngica de las AgNPs se muestran en la Tabla 1. En este experimento, las NPs de nitrato y sulfato de plata mostraron un crecimiento micelar de 12.22 mm y 14.35 mm frente a *Fusarium oxysporum*, mientras que para *Alternaria solani* presentaron valores de 8.28 mm y 10.94 mm, respectivamente. Por su parte, el control negativo presentó un crecimiento micelar promedio de 2.53 mm para ambos patógenos; por lo contrario, el control positivo presentó un crecimiento micelar promedio para ambos patógenos de 38.46 mm.

En general, las AgNPs mostraron inhibición micelar frente a los patógenos, donde las AgNNPs tuvieron mayor efecto, en comparación con las AgSNPs. El efecto antifúngico de las AgNPs inhibe el crecimiento fúngico al dañar la pared y la membrana celular, las mitocondrias, la cromatina y los ribosomas. Esto provoca tanto la ruptura de la membrana celular como otras deformaciones celulares. Además, por efecto de la liberación de iones de plata de las nanopartículas, induce estrés oxidativo, generando daño en los lípidos de la membrana (peroxidación lipídica), ADN y proteínas, provocando la pérdida de integridad de la membrana plasmática, fuga del contenido citoplasmático y, finalmente, la lisis celular, contribuyendo a la actividad antifúngica de las NP (Prasher *et al.*, 2018; Xia *et al.*, 2016). Por consiguiente, las AgNPs deben presentar un tamaño $\leq 100 \text{ nm}$. Así, el tamaño es crucial puesto que, a menor tamaño, mayor es la superficie específica y mayor la capacidad de penetrar las membranas fúngicas.

Por otra parte, la forma de las NP debe ser esférica o quasi-esférica. Las formas esféricas a menudo muestran una mayor actividad antimicrobiana debido a una distribución de carga más uniforme y mejor interacción con la pared celular fúngica. La estabilidad coloidal es esencial para prevenir la agregación de las AgNPs, ya que este fenómeno reduce su área superficial activa. El uso de estabilizantes es fundamental para mantener su eficacia en el tiempo. La estructura cristalina y síntesis debe ser adecuada, debido a que las AgNPs con una estructura cristalina definida —a menudo sintetizadas mediante métodos biogénicos (usando extractos de plantas u hongos)— muestran una alta capacidad inhibitoria contra hongos fitopatógenos y patógenos humanos. La carga superficial de las NP puede requerir cargas superficiales (frecuentemente negativas para penetrar ciertas barreras, aunque las positivas pueden interactuar mejor con la pared negativa del hongo) ajustadas mediante agentes de recubrimiento (Górka & Kubiński, 2023; Kumar *et al.*, 2025; Le Ouay & Stellacci, 2015).

Tabla 1. Actividad antifúngica de AgNPs contra microorganismos fitopatógenos.

Nanopartículas	Microorganismo	
	<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>Alternaria solani</i>
AgNNPs	12.22 ± 0.20 ^a	8.28 ± 0.18 ^b
AgSNPs	14.35 ± 0.22 ^a	10.94 ± 0.23 ^b

Nota. AgNNPs = Nanopartículas de nitrato de plata; AgSNPs = Nanopartículas de sulfato de plata. Diferentes letras minúsculas entre columnas presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre cada microorganismo con respecto a cada AgNPs.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Las AgNPs presentaron tamaños de partícula catalogados como partículas submicrónicas. El estudio DLS confirmó el tamaño de ambas NP, obteniendo tamaños <1000 nm. El espectro UV-Visible mostró un pico débil y otro intenso para la formación de NP. El estudio FTIR evidenció información sobre los principales grupos funcionales e interacción con los iones metálicos de plata. La actividad antifúngica demostró efecto sobre ambos patógenos. Las nanopartículas (NP) prometen transformar y mejorar el tratamiento contra infecciones fúngicas en el sector agropecuario mediante la biotecnología.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los estudiantes del programa educativo de Ingeniería Biotecnológica Agrícola ICA-UABC: María Isabel López-Cortez, Ángel Chávez-Garate y David Casillas-López, por el apoyo brindado en este trabajo y en los bioensayos.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés con la presentación de este trabajo.

Referencias

- Alabrahim, O. A. A., Abdeldayem, A. M., & Azzazy, H. M. E. S. (2025). Green synthesis of metallic nanoparticles using *Pistacia* species: improved stability and biological activities. *Nanoscale Advances*, 7(18), 5449-5478. <https://doi.org/10.1039/d5na00644a>
- Anandalakshmi, K., Venugobal, J., & Ramasamy, V. (2016). Characterization of silver nanoparticles by green synthesis method using *Pedaliu murex* leaf extract and their antibacterial activity. *Applied Nanoscience*, 6, 399-408. <https://doi.org/10.1007/s13204-015-0449-z>
- Basilio-Cortes, U. A., Ramírez-Rodrigues, M. M., Ramírez-Rodrigues, M. A., González-Mendoza, D., Tzintzun-Camacho, O., Durán-Hernández, D., & González-Salitre, L. (2024). Phytochemical, spectroscopic analysis and antifungal activity on bell peppers of hydrothermal bioactive metabolites of *Humulus lupulus* L. extracts. *Natural Product Research*, 39(24), 7054-7065. <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2405010>
- Carotenuto, G., Palomba, M., Cristino, L., Di Grazia, M. A., De Nicola, S., & Nicolais, F. (2013). Preparation and characterization of antimicrobial silver/polystyrene nanocomposites. En G. Carotenuto & L. Nicolais (eds.), *Nanocomposites: In Situ Synthesis of Polymer-Embedded Nanostructures* (pp. 195-207). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118742655.ch9>
- Das, P., Dutta, T., Manna, S., Loganathan, S., & Basak, P. (2022). Facile green synthesis of non-genotoxic, non-hemolytic organometallic silver nanoparticles using extract of crushed, wasted, and spent *Humulus lupulus* (hops): characterization, anti-bacterial, and anti-cancer studies. *Environmental Research*, 204, 111962. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111962>

- Deka, K., Nongbet, R. D., Das, K., Saikia, P., Kaur, S., Talukder, A., & Thakuria, B. (2025). Understanding the mechanism underlying the green synthesis of metallic nanoparticles using plant extract(s) with special reference to silver, gold, copper and zinc oxide nanoparticles. *Hybrid Advances*, 9, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100399>
- Elmusa, F., Aygun, A., Gulbagca, F., Seyrankaya, A., Göl, F., Yenikaya, C., & Sen, F. (2021). Investigation of the antibacterial properties of silver nanoparticles synthesized using *Abelmoschus esculentus* extract and their ceramic applications. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(4), 849-860. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02883-x>
- González-Salitre, L., González-Olivares, L. G., & Basilio-Cortes, U. A. (2023). *Humulus lupulus* L. a potential precursor to human health: high hops craft beer. *Food Chemistry*, 405, 134959. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134959>
- Górka, K., & Kubiński, K. (2023). Antifungal activity against human and plant mycopathogens, and green synthesis of silver nanoparticles exhibiting such activity. *Applied Sciences*, 14(1), 115. <https://doi.org/10.3390/app14010115>
- Hamelian, M., Zangeneh, M. M., Amisama, A., Varmira, K., & Veisi, H. (2018). Green synthesis of silver nanoparticles using *Thymus kotschyanus* extract and evaluation of their antioxidant, antibacterial and cytotoxic effects. *Applied Organometallic Chemistry*, 32(9), e4458. <https://doi.org/10.1002/aoc.4458>
- Jain, A. K., & Thareja, S. (2019). *In vitro* and *in vivo* characterization of pharmaceutical nanocarriers used for drug delivery. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 47(1), 524-539. <https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1561457>
- Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., & Danquah, M. K. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9(1), 1050-1074. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98>
- Khan, S., Zahoor, M., Khan, R. S., Ikram, M., & Islam, N. U. (2023). The impact of silver nanoparticles on the growth of plants: the agriculture applications. *Heliyon*, 9(6), e16928. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16928>
- Kumar, M., Saini, R. V., Gupta, M., & Singh, R. (2025). Green synthesis of silver nanoparticle (Cha-AgNPs) using *Chenopodium album* extract and evaluation of their antifungal potential against pathogenic fungi. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 8955-8966. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05721-z>
- Kyaw, K., Harada, A., Ichimaru, H., Kawagoe, T., Yahiro, K., Morimura, S., Ono, K., Tsutsuki, H., Sawa, T., & Niidome, T. (2017). Silver nanoparticles as potential antibiofilm agents against human pathogenic bacteria. *Chemistry Letters*, 46(4), 594-596. <https://doi.org/10.1246/cl.161198>
- Le Ouay, B., & Stellacci, F. (2015). Antibacterial activity of silver nanoparticles: a surface science insight. *Nanotoday*, 10(3), 339-354. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.04.002>
- Malik, M. A., Wani, A. H., Bhat, M. Y., Siddiqui, S., Alamri, S. A. M., & Alrumman, S. A. (2024). Fungal-mediated synthesis of silver nanoparticles: a novel strategy for plant disease management. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1399331. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1399331>
- Prasher, P., Singh, M., & Mudila, H. (2018). Green synthesis of silver nanoparticles and their antifungal properties. *BioNanoScience*, 8, 254-263. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0481-4>
- Rodrigues, T., Fontes, P., Silva, P. I., & Campos, P. (2021). A new perspective of a well-recognized raw material: phenolic content, antioxidant and antimicrobial activities and α - and β -acids profile of Brazilian hop (*Humulus lupulus* L.) extracts. *LWT*, 141, 110905. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110905>
- Romero-Urbina, D. G., Lara, H. H., Velázquez-Salazar, J. J., Arellano-Jiménez, M. J., Larios, E., Srinivasan, A., López-Ribot, J. L., & Yacamán, M. J. (2015). Ultrastructural changes in methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* induced by positively charged silver nanoparticles. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6(1), 2396-2405. <https://doi.org/10.3762/bjnano.6.246>
- Titus, D., Samuel, E. J. J., & Roopan, S. M. (2019). Nanoparticle characterization techniques. In *Green synthesis, characterization and applications of nanoparticles* (pp. 303-319). Elsevier.
- Sharma, R., Dhillon, A., & Kumar, D. (2018). Mentha-Stabilized Silver Nanoparticles for High-Performance Colorimetric Detection of Al(III) in Aqueous Systems. *Scientific Reports*, 8, 5189. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23469-1>

- Stack, M., Parikh, D., Wang, H., Wang, L., Xu, M., Zou, J., Cheng, J., & Wang, H. (2019). Chapter 25 - Electrospun Nanofibers for Drug Delivery. En B. Ding, X. Wang & J. Yu (eds.), *Electrospinning: nanofabrication and applications* (pp. 735-764). William Andrew. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51270-1.00025-X>
- Sun, B., Ao, Y. L., Cao, X., Zhang, J. B., Zhang, X., Lu, D. H., Lin, M., Liu, J. S., & Zhang, X. Q. (2025). Hop bitter acids from the pistillate flower of *Humulus lupulus* L. and their anti-inflammatory and anti-dengue virus activities. *Phytochemistry*, 241, 114689. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2025.114689>
- Xia, Z. K., Ma, Q. H., Li, S. Y., Zhang, D. Q., Cong, L., Tian, Y. L., & Yang, R. Y. (2016). The antifungal effect of silver nanoparticles on *Trichosporon asahii*. *Journal of Microbiology, Immunology and Infection*, 49(2), 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.jmii.2014.04.013>
- Xiao, X., Wang, D., Younis, O., Zhang, X., Al-Hossainy, A. F., Yavuz, C. T., Yang, X., & Cheng, H. M. (2025). Recent advances in metallic core-shell nanoparticles for electrocatalysis: synthesis, characterization, and applications. *Journal of Energy Chemistry*, 110, 227-245. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2025.06.057>
- Zayed, M. F., Eisa, W. H., El-Kousy, S. M., Mleha, W. K., & Kamal, N. (2019). *Ficus retusa*-stabilized gold and silver nanoparticles: controlled synthesis, spectroscopic characterization, and sensing properties. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 214, 496-512. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.02.042>
- Zehra, S. H., Ramzan, K., Viskelis, J., Viskelis, P., & Balciunaitiene, A. (2025). Advancements in green synthesis of silver-based nanoparticles: antimicrobial and antifungal properties in various films. *Nanomaterials*, 15(4), 252. <https://doi.org/10.3390/nano15040252>