

Efecto dual de las nanopartículas de plata sobre el crecimiento de raíces de *Allium cepa* y en la inhibición de *Pseudomonas*[◇]

Dual effect of silver nanoparticles on *Allium cepa* root growth and *Pseudomonas* inhibition

Juárez-Salinas, C. E.,^{*,**} Barrera-Calva, E.,^{*} Ventura-Reyes, R. I.,^{**,***} Ramírez-Romero, P.,^{***} Fernández-Rendón, C. L.^{***,†}

ABSTRACT: This study aimed to evaluate the effect of silver nanoparticles (AgNPs) on *Allium cepa* growth and their capacity to inhibit *Pseudomonas* species. The AgNPs were synthesized via a chemical reaction using sodium borohydride and sodium citrate, and characterized by X-ray diffraction, transmission electron microscopy (TEM), and UV-Vis spectroscopy. The AgNPs exhibited a cubic crystal structure, a 20 nm spherical shape, and a plasmonic resonance with a maximum at 400 nm. Bioassays were performed using onion roots exposed to varying AgNP concentrations, alongside bacteria of the *Pseudomonas* genus. The AgNPs at 5 mg/L promoted onion root growth, whereas concentrations above 50 mg/L inhibited root elongation. The 10% inhibitory concentration (IC₁₀) for root growth was 9 mg/L, and the median inhibitory concentration (IC₅₀) was 46.01 mg/L. For bacteria, the minimum inhibitory concentration (MIC) ranged from 5 to 10 mg/L for *P. fluorescens*, *P. aeruginosa*, and *P. putida*. These findings suggest that AgNPs can inhibit beneficial *Pseudomonas* species for plants but may also be used to control phytopathogenic bacteria with minimal inhibition on *Allium cepa*.

KEYWORDS: silver nanoparticles, toxicity bioassays, *Allium cepa*, *Pseudomonas*, phytopathogen.

RESUMEN: El propósito de este estudio fue evaluar el efecto de las nanopartículas de plata (AgNPs) sobre el crecimiento de *Allium cepa* y su capacidad para inhibir el crecimiento de especies de *Pseudomonas*. Las AgNPs fueron sintetizadas mediante una reacción química con borohidruro de sodio y citrato de sodio, y se caracterizaron por difracción de rayos X, microscopía electrónica de transmisión (TEM) y espectroscopía UV-Vis. Las AgNPs presentaron una estructura cristalina cúbica, forma esférica de 20 nm y una resonancia plasmónica con un máximo en 400 nm. Se realizaron bioensayos con raíces de cebolla expuestas a diferentes concentraciones de AgNPs y con bacterias del género *Pseudomonas*. Las AgNPs a 5 mg/l promovieron el crecimiento de las raíces de cebolla, mientras que concentraciones superiores a 50 mg/l inhibieron su elongación. La concentración inhibitoria del 10% (CI₁₀) para el crecimiento de las raíces fue

Recibido: 21 de julio, 2025. Aceptado: 4 de noviembre, 2025. Publicado: 15 de enero, 2026.

[◇] Agradecimientos al Dr. Javier Carrillo Campos de la UnADM por su asesoría durante la realización de este trabajo. También a María Fernanda Pascual Hernández y Antonio de Jesús Candelas Vázquez por su contribución y participación en el mantenimiento del cepario del Laboratorio de Ecotoxicología de la UAM Iztapalapa.

^{*} Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. Ciudad de México, México.

^{**} Universidad Abierta y a Distancia de México, Ingeniería en Biotecnología. Ciudad de México, México.

^{***} Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Hidrobiología. Ciudad de México, México.

[†] Autor de correspondencia: carlosfdz07@gmail.com



de 9 mg/l y la concentración inhibitoria media (CI_{50}) fue de 46.01 mg/l. Para las bacterias, la concentración mínima inhibitoria (CMI) fue de 5 a 10 mg/l para las especies *P. fluorescens*, *P. aeruginosa* y *P. putida*. Esto indica que las AgNPs pueden inhibir el desarrollo de especies de *Pseudomonas* benéficas para las plantas, pero también pueden utilizarse para controlar bacterias fitopatógenas con poca inhibición sobre *Allium cepa*.

PALABRAS CLAVE: nanopartículas de plata, bioensayos de toxicidad, *Allium cepa*, *Pseudomonas*, fitopatógeno.

Introducción

Las nanopartículas de plata (AgNPs) se encuentran entre los nanomateriales más utilizados a nivel mundial en diferentes sectores como la industria farmacéutica, alimentaria, biomédica, textil y agrícola, debido a su alta capacidad como agentes antimicrobianos (Casillas-Figueroa *et al.*, 2020). La síntesis de AgNPs se realiza por métodos químicos, físicos y biológicos. A través de métodos químicos y biológicos, las nanopartículas se pueden sintetizar mediante el autoensamblaje de átomos en nuevos núcleos que crecen hasta convertirse en partículas a escala nanométrica (Nie *et al.*, 2023). Los métodos de síntesis y sus parámetros determinan la forma, el tamaño y la distribución de las nanopartículas (Rehal *et al.*, 2023). Las propiedades fisicoquímicas de las AgNPs, como el tamaño, la forma y la estabilidad pueden provocar diferentes efectos tóxicos y acumulación en distintos organismos como mamíferos, plantas y bacterias (Casillas-Figueroa *et al.*, 2020).

En el contexto agrícola, las AgNPs han adquirido un gran interés debido a su potencial para mejorar el crecimiento de los cultivos y a sus propiedades para combatir microorganismos fitopatógenos (Agnihotri *et al.*, 2014; Rojas-Avelizapa *et al.*, 2020). Estas nanopartículas pueden fomentar el rápido desarrollo de las raíces e incrementar la producción de ciertas sustancias que promueven el desarrollo de las plantas. Sin embargo, también pueden tener efectos tóxicos y afectar su fisiología (Yan y Chen, 2019).

La evidencia científica sobre los efectos de las AgNPs en las plantas es variable y depende de factores como la especie, la concentración y la ruta de exposición. Se ha observado un mejor desarrollo de las plántulas de trigo con concentraciones de 1 a 10 mg/Kg de AgNPs en tierra (Wang *et al.*, 2016). También se ha reportado que el uso de las AgNPs favorece el desarrollo de *Vanilla planifolia* durante la micropropagación *in vitro* porque controla la contaminación microbiana y en concentraciones bajas (0, 25, 50 y 100 mg/l) promueve el desarrollo de las plántulas (Pastelín-Solano *et al.*, 2020). Sin embargo, Singh y Kumar (2020) no encontraron diferencias significativas en el desarrollo vegetal de *Spinacia oleracea* al usar concentraciones de 1 a 10 mg/Kg de AgNPs en tierra húmeda.

En el caso de *Allium cepa*, Casillas-Figueroa *et al.*, (2020) realizaron pruebas con concentraciones de 5 a 100 μ g/ml de AgNPs de la marca Argovit y concluyeron que concentraciones menores a 10 μ g/ml promueven el crecimiento de la planta sin ocasionar daños tóxicos a las raíces. También se ha

reportado un mayor porcentaje de germinación de semillas y un desarrollo más rápido de la plántula de cebolla con una concentración de 31.3 mg/l de AgNPs (Acharya *et al.*, 2020).

Además de los efectos de las AgNPs en el crecimiento de las plantas, se ha valorado su capacidad de acumulación en los tejidos vegetales. Li *et al.* (2017) evaluaron el efecto de las AgNPs a concentraciones de 0, 0.1, 0.5, 1, 10 y 30 mg/l por exposición foliar y radicular en plantas de soja (*Glycine max*) y de arroz (*Oryza sativa*) y reportaron mayor inhibición en el crecimiento y efectos tóxicos por vía radicular, pero mayor acumulación en tejido por vía foliar. Larue *et al.* (2014) probaron el efecto de las AgNPs a concentraciones de 0, 1, 10 y 100 µg/g por exposición foliar en lechuga (*Lactuca sativa*) y no detectaron diferencias en la biomasa ni efectos tóxicos en cuanto a la concentración de pigmentos y proteínas, pero registraron acumulación de AgNPs en tejidos.

Paralelamente al potencial de las AgNPs como promotores de crecimiento vegetal, existe un interés en la utilización de estas nanopartículas para el control de fitopatógenos en los cultivos de diferentes plantas. Las AgNPs pueden actuar como agentes antimicrobianos, combatiendo patógenos como bacterias, hongos y virus que perjudican diversos cultivos. Distintos estudios han probado el potencial de las AgNPs para controlar fitopatógenos en diferentes tipos de cultivos (Chen *et al.*, 2023). Las AgNPs son útiles para inhibir hongos como: *Fusarium graminearum*, *Rhizoctonia oryzae-sativa*, *Pyricularia oryzae*, *Sclerotium oryzae*, entre otros (Sanguineto, 2023). También se pueden utilizar para controlar bacterias porque son sensibles a la presencia de las AgNPs (Agnihotri *et al.*, 2014). Se ha reportado que las AgNPs son útiles para inhibir bacterias Gram negativas como: *Pseudomonas sp*, *Serratia sp*, *Xanthomonas sp*, *Erwinia carotovora* y *Acinetobacter sp*; y bacterias Gram positivas como: *Bacillus sp* (Rojas-Avelizapa *et al.*, 2020). Además, las AgNPs inhiben el desarrollo de biopelículas bacterianas (Hamed *et al.*, 2020).

Sin embargo, también es importante considerar el posible impacto negativo de las AgNPs en la microbiota del suelo y en los organismos benéficos que contribuyen a la salud de los cultivos (Palencia *et al.*, 2013). El género *Pseudomonas* comprende bacterias que interactúan con las raíces de las plantas y desempeñan roles tanto beneficiosos como patogénicos. Las especies *P. fluorescens*, *P. aeruginosa* y *P. putida* pueden actuar como bacterias promotoras del crecimiento vegetal porque su amplio repertorio metabólico incluye la producción de fitohormonas, la solubilización de fósforo y la fijación de nitrógeno atmosférico (Cano, 2011; Pérez-Álvarez *et al.*, 2015; Jain y Das, 2016; Velasco-Jiménez *et al.*, 2020; Costa-Gutierrez *et al.*, 2022; Sánchez-Carrillo y Guerra-Ramírez, 2022). Además, su capacidad para producir distintos compuestos con actividad antimicrobiana las hace adecuadas para el biocontrol de bacterias y hongos dañinos para las plantas (Kupferschmid *et al.*, 2013; Sánchez-Carrillo y Guerra-Ramírez, 2022).

Aunque menos común, algunas especies de *Pseudomonas* pueden ser fitopatógenas. *P. syringae* es un miembro de la comunidad bacteriana de la filósfera y es considerada un patógeno típico (Kupferschmied *et al.*, 2013; Jain y Das, 2016). *P. aeruginosa* ha sido reportada en interacciones con raíces de plantas que afectan negativamente el desarrollo vegetal (Walker *et al.*, 2004). *P. fluorescens*, también se ha reportado como bacteria fitopatógena oportunista en cultivos causando lesiones, necrosis y pudrición (Pérez-Álvarez *et al.*, 2015).

En general, las AgNPs pueden tener un impacto dual sobre los cultivos (Budhani *et al.*, 2019). En cuanto a los efectos positivos, se incluye la protección ante enfermedades por las propiedades antimicrobianas y antifúngicas (Das *et al.*, 2022). Entre los efectos negativos, las AgNPs pueden afectar a bacterias benéficas para los cultivos y en altas concentraciones pueden ser tóxicas para las plantas al inhibir la multiplicación celular y provocar daño genético (Scherer *et al.*, 2019). Por lo anterior, existe la necesidad de determinar concentraciones de AgNPs que sean efectivas para el control de bacterias fitopatógenas, sin afectar el crecimiento de las plantas y se requieren modelos como plantas y bacterias para evaluar los efectos de las AgNPs. *Allium cepa* es considerada uno de los sistemas vegetales más sensibles para determinar los efectos tóxicos de diversos agentes químicos (Casillas-Figueroa *et al.*, 2020; Díaz-Baez *et al.*, 2008). Adicionalmente, las especies del género *Pseudomonas*, que pueden actuar como bacterias benéficas o patógenas (Pérez-Álvarez *et al.*, 2015; Jain y Das, 2016), son adecuadas para determinar el efecto antibacteriano mediante la concentración mínima inhibitoria (Agnihotri *et al.*, 2014).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de las nanopartículas de plata (AgNPs), sintetizadas por la ruta química de borohidruro de sodio, sobre el crecimiento de las raíces de *Allium cepa* y su capacidad inhibitoria sobre bacterias del género *Pseudomonas* (puediendo ser benéficas o fitopatógenas), con el fin de determinar una concentración que pueda controlar fitopatógenos, sin afectar significativamente el desarrollo radicular.

Materiales y métodos

Síntesis y caracterización de nanopartículas de plata

Las nanopartículas de plata se sintetizaron por la ruta química de borohidruro de sodio y citrato de sodio, en la cual, el borohidruro de sodio actúa como agente reductor sobre la sal de plata y el citrato de sodio actúa como estabilizante durante el periodo de nucleación y crecimiento a fin de mantener dimensiones nanométricas. Se disolvieron 59.8 mg de borohidruro de sodio (NaBH_4 , marca Meyer) en 100 ml de agua desionizada y 102.4 mg de citrato de sodio ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$, marca Meyer) en 100 ml de agua desionizada y 314.9 mg de nitrato de plata (AgNO_3 , marca Meyer) en 100 ml de agua desionizada,

cada una en un matraz aforado. Después se mezclaron las soluciones de boro-hidruro de sodio y de citrato de sodio agregando la solución de nitrato de plata al final para conseguir diferentes concentraciones de AgNPs de acuerdo con la bibliografía consultada (Rehal *et al.*, 2023).

La caracterización de las AgNPs se realizó por difracción de rayos X, microscopía electrónica de transmisión y espectrofotometría UV-Vis. La difracción de rayos X se utilizó para determinar la estructura cristalina de las AgNPs (Baraka *et al.*, 2017). Se utilizó un difractómetro Bruker D8 Advance, operando en geometría de Bragg-Brentano. Este equipo consta de un tubo de ánodo de cobre y un detector “ojo de lince” basado en tiras de silicio, y las mediciones se realizaron en un rango de 30° a 80° en 2 theta.

La microscopía electrónica de transmisión permitió evaluar la morfología y el tamaño de las nanopartículas (Thiruvengadam y Bansod 2020). Finalmente, se registró la resonancia plasmónica de las AgNPs a concentraciones de 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 y 150 mg/l, en un intervalo de 300 a 800 nm mediante espectrofotometría UV-Vis (Sivaramakrishnan *et al.*, 2019) con un equipo Varian 5E UV-Vis-NIR.

Bioensayos

El bioensayo de *Allium cepa* consistió en evaluar el crecimiento de las raíces de cebolla expuestas a distintas concentraciones del compuesto y comparar su elongación con la del control (Díaz-Baez *et al.*, 2008). Se consideraron 6 concentraciones de AgNPs: 1, 5, 10, 50, 100 y 150 mg/l, un control negativo (agua mineral dura sin AgNPs) y un control positivo (sulfato de cobre con una concentración de 320 mg/l), con 8 réplicas para cada tratamiento. Se sintetizaron las nanopartículas y, posteriormente, se mezclaron con agua mineral comercial en una proporción 1:1 para obtener las seis concentraciones de AgNPs. Los bulbos de cebolla se colocaron en incubación con luz (lámpara MAGG F24T5HO, 4100K, 24W) durante 8 días (192 h) y, luego, se midió la longitud de las raíces por cada tratamiento.

Se realizó un bioensayo para determinar la concentración mínima inhibitoria de las AgNPs en bacterias del género *Pseudomonas*. Se utilizaron cepas de la colección del Laboratorio de Ecotoxicología de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Las especies seleccionadas fueron: *P. fluorescens*, *P. aeruginosa*, *P. putida* y *Pseudomonas sp.* Estas cepas fueron aisladas de las cisternas de la UAM-Iztapalapa e identificadas por amplificación del gen ARNr 16S y secuenciación (Pascual-Hernández, 2025).

Se preparó caldo nutritivo (Bioxon) en tubos de ensayo y se esterilizaron en autoclave (121 °C a una presión de 15 psi durante 15 min). Después de la esterilización se agregaron 9 concentraciones de AgNPs: 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25 y 50 mg/l, y se consideró un control negativo (sin AgNPs), con dos réplicas por cada tratamiento. Cada especie de bacteria fue sembrada en una serie de tubos con distintas concentraciones de AgNPs y el control. Los tubos se incubaron a 28 °C durante 24 h y se midió la absorbancia a una longitud

de onda de 600 nm para estimar el crecimiento bacteriano en los tubos y determinar la concentración mínima inhibitoria (Agnihotri *et al.*, 2014; Rojas-Avelizapa *et al.*, 2020). Adicionalmente, se realizó el conteo de unidades formadoras de colonia con la técnica de goteo en placa (Muñoz-Rojas *et al.*, 2016), para tener un estimado del número de bacterias relacionado con los valores de absorbancia.

Procesamiento de datos

Con los datos de la longitud de las raíces de todos los bulbos de cebolla se calculó el porcentaje de inhibición (Díaz-Baez *et al.*, 2008) para cada concentración utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Efecto de inhibición} = \frac{(\text{longitud del control} - \text{longitud de la muestra})}{\text{longitud del control}} \times 100$$

Con los porcentajes de inhibición del crecimiento de cada concentración de las AgNPs se elaboró una gráfica dosis-respuesta y una regresión probit en RStudio para obtener la concentración de inhibición del 50% (CI₅₀) y la concentración de inhibición del 10% (CI₁₀).

En las especies de *Pseudomonas*, la concentración mínima inhibitoria se definió como la menor concentración de las AgNPs con ausencia de crecimiento bacteriano en el tubo con caldo nutritivo, confirmado con los valores de absorbancia obtenidos.

Los análisis estadísticos se realizaron con el *software* NCSS. Los datos no cumplieron con el supuesto de normalidad (evaluado mediante la prueba de Shapiro-Wilk), por lo cual se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$) (Zar, 2019) para identificar las diferencias significativas en el porcentaje de inhibición de la elongación de las raíces en los tratamientos.

Resultados

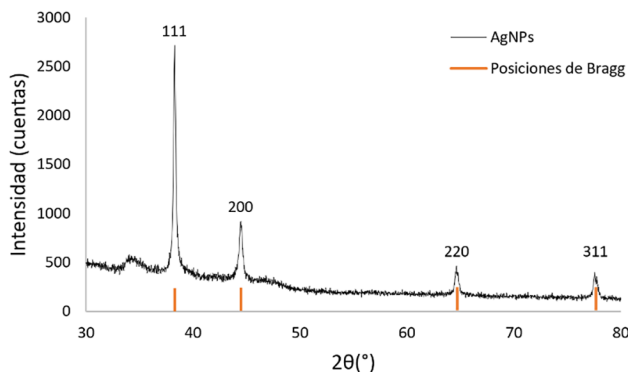
Caracterización de las nanopartículas de plata

La estructura cristalina de las AgNPs se determinó a través de difracción de rayos X. La figura 1 muestra los patrones de difracción que corresponde a plata en estado metálico entre los 30° y 80°, estos coinciden con los máximos de reflexión reportados en la tarjeta ICDD-00-003-0921 con estructura cúbica. En la imagen se muestra tanto el patrón de difracción de la muestra, las respectivas posiciones Bragg y los índices de Miller correspondientes a cada pico de difracción.

En la figura 2 se muestran los resultados de la microscopía electrónica de transmisión de las nanopartículas sintetizadas en este proyecto. Las imágenes revelan que se tienen nanopartículas de forma principalmente esférica con tamaños principalmente de 20 nm.

Los espectros UV-Vis mostraron un pico de resonancia plasmónica en los 400 nm, a concentraciones de 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 y 150 mg/l

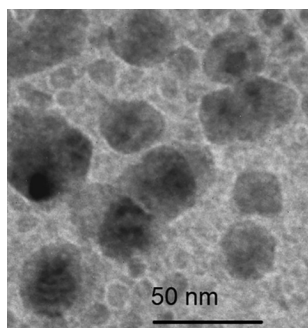
Figura 1. Difractograma de rayos X de las nanopartículas de plata sintetizadas.



Los picos identificados corresponden a los planos cristalinos (111), (200), (220) y (311) de la plata metálica con estructura cúbica centrada en las caras (ICDD-00-003-0921).

Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 2. Micrografía de microscopía electrónica de transmisión (TEM) de las nanopartículas de plata sintetizadas.



La escala representa 50 nm. Se observan nanopartículas esféricas con un tamaño promedio de 20 nm.

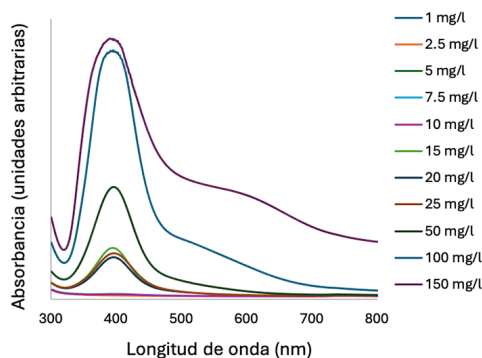
Fuente: Elaboración de los autores.

de AgNPs (figura 3). A través de estos espectros y utilizando el modelo de Mie-Gans (Amirjani *et al.*, 2020; Car y Krstulović, 2022) se estimó un tamaño de 20 nm y una forma principalmente esférica para bajas concentraciones, información corroborada por microscopía electrónica de transmisión.

Bioensayo de *Allium cepa* expuesta a diferentes concentraciones de AgNPs

En la tabla 1 se reporta la longitud de las raíces de cebolla para los controles y las diferentes concentraciones de AgNPs. También se incluye el porcentaje de inhibición en la elongación de las raíces respecto al control. Se observó un mayor porcentaje de inhibición en el crecimiento de las raíces de cebolla al incrementar la concentración de las AgNPs. Sin embargo, con 5 mg/l de AgNPs se registró más crecimiento que en el control negativo (agua mineral).

Figura 3. Resonancia plasmónica de las AgNPs obtenidas en diferentes concentraciones.



Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 1. Porcentaje de inhibición por AgNPs en raíces de *Allium cepa*.

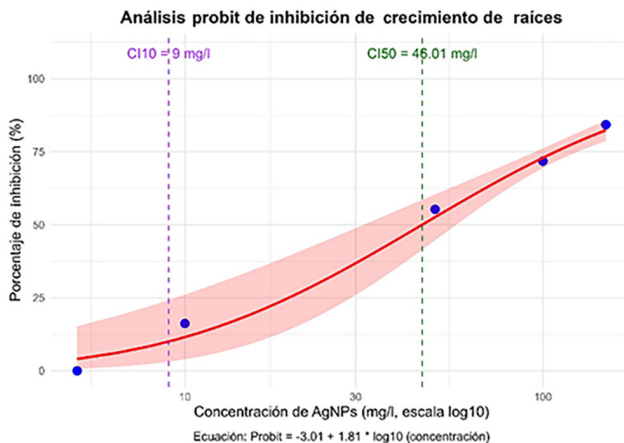
Concentración de AgNPs (mg/l)	Longitud de raíz promedio (mm)	Inhibición de crecimiento de raíz (%)
0	13.2	0.0
1	10.9	17.9
5	15.0	-13.8
10	11.1	16.2
50	5.9	55.3
100	3.7	71.8
150	2.1	84.3
Control positivo (CuSO ₄) 320	1.3	90.4

Fuente: Elaboración de los autores.

Con los datos de la tabla 1, se realizó una gráfica dosis-respuesta (figura 4) y una regresión para estimar la concentración inhibitoria media, cuyo valor fue de 46.01 mg/l de AgNPs, mientras que, la concentración inhibitoria del 10% fue de 9 mg/l.

La prueba de Kruskal-Wallis reveló que la longitud de las raíces de cebolla fue afectada significativamente por las concentraciones de las AgNPs. En la figura 5 se presentan los diagramas de caja y bigote, correspondientes al control positivo (CP), al control negativo (CN) y a las distintas concentraciones de las AgNPs desde 1 a 150 mg/l. La concentración de 5 mg/l de AgNPs favoreció el crecimiento de las raíces de cebolla y mostró diferencias significativas respecto al control negativo. Mientras que las concentraciones de 50, 100 y 150 mg/l de las AgNPs mostraron inhibición en la elongación de las raíces de cebolla con diferencias significativas respecto al control negativo.

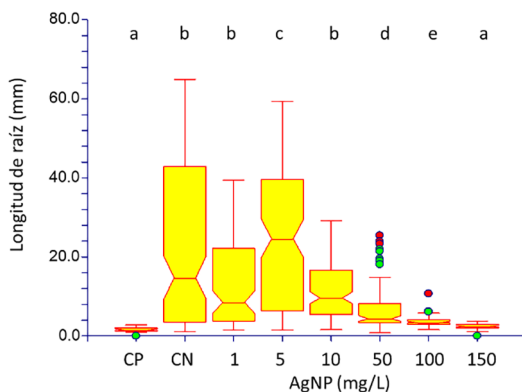
Figura 4. Curva dosis-respuesta para la inhibición del crecimiento radicular de *Allium cepa* expuesta a las nanopartículas de plata.



La línea continua corresponde al ajuste del modelo probit, la zona sombreada a los intervalos de confianza al 95% y las líneas punteadas indican las concentraciones inhibitorias CI_{10} (9 mg/L) y CI_{50} (46 mg/L).

Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 5. Longitud de las raíces de *Allium cepa* expuestas a diferentes concentraciones de AgNPs.



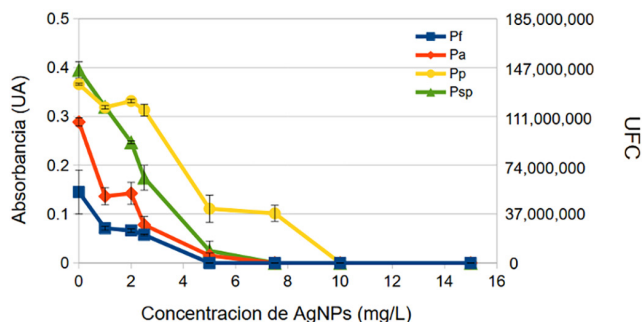
CP: control positivo (CuSO_4 , 320 mg/L); CN: control negativo. Los tratamientos corresponden a concentraciones de: 1, 5, 10, 50, 100 y 150 mg/L de las AgNPs. Las letras diferentes sobre las cajas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$, Kruskal-Wallis).

Fuente: Elaboración de los autores.

Bioensayo de bacterias del género *Pseudomonas* expuesta a diferentes concentraciones de AgNPs

En la figura 6 se muestra la absorbancia y la concentración de bacterias de las especies de *Pseudomonas* en el control y expuestas a diferentes concentraciones de AgNPs. Al aumentar la concentración de las AgNPs se observó una inhibición en el crecimiento de las especies de *Pseudomonas*.

Figura 6. Concentración de bacterias (absorbancia a 600 nm y UFC) de diferentes especies de *Pseudomonas* expuestas a diferentes concentraciones de las nanopartículas de plata.



Pf: *P. fluorescens*; Pa: *P. aeruginosa*; Pp: *P. putida*; Psp: *Pseudomonas* sp.
 Fuente: Elaboración de los autores.

Se encontró una concentración mínima inhibitoria distinta para cada especie de *Pseudomonas*. La inhibición de crecimiento de *P. fluorescens* ocurrió a partir de los 5 mg/l de AgNPs, mientras que para *P. aeruginosa* y *Pseudomonas* sp la inhibición fue a los 7.5 mg/l y para *P. putida* fue a los 10 mg/l. La concentración que inhibió el crecimiento de las raíces de cebolla en un 10% fue de 9 mg/l de AgNPs, un valor similar a la concentración mínima inhibitoria para las bacterias (tabla 2).

Tabla 2. Comparación de las concentraciones de inhibición de los bioensayos.

Bioensayo	Concentración de inhibición
<i>Allium cepa</i>	Cl ₅₀ = 46.0 mg/l Cl ₁₀ = 9.0 mg/l
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	CMI = 5.0 mg/l
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	CMI = 7.5 mg/l
<i>Pseudomonas putida</i>	CMI = 10.0 mg/l
<i>Pseudomonas</i> sp.	CMI = 7.5 mg/l

Fuente: Elaboración de los autores.

Discusión

La síntesis química de las nanopartículas de plata requiere de proporciones idóneas de la sal de plata, borohidruro de sodio (reductor) y citrato de sodio (estabilizante), debido a que estas proporciones impactan directamente en los procesos de nucleación y formación de las AgNPs (Rehal *et al.*, 2023). En esta investigación se obtuvieron nanopartículas, las cuales, a escala atómica (del orden de Ångströms), tienen estructura cristalina cúbica de acuerdo con los patrones de difracción de rayos x. Las curvas de absorbancia espectral muestran un máximo en los 400 nm (figura 3) en concentraciones de 1 a 50

mg/l, con curvas tipo lorentzianas permitiendo deducir que las AgNPs, a escala nanométrica, tienen simetría esférica. El barrido de absorbancia, que corresponde a las concentraciones más altas (100 y 150 mg/l), muestra curvas sugiriendo la formación de agregados de mayor tamaño (Agnihotri *et al.*, 2014). La información anterior es corroborada por microscopía electrónica de transmisión (TEM) en donde se observaron nanopartículas de forma esférica, de diferentes tamaños, pero que en su mayoría no exceden los 20 nm (figura 2).

Se observó un efecto positivo en el crecimiento de las raíces de *Allium cepa* con una concentración de 5 mg/l de AgNPs. Otras investigaciones también reportan un mayor crecimiento de las plantas de trigo (Wang *et al.*, 2016) y *Lactuca sativa* (Akhoundnejad y Karakaş, 2021) cuando se emplean concentraciones bajas de AgNPs. Casillas-Figueroa *et al.* (2020), también reportan que a concentraciones menores a 10 µg/ml de AgNPs de la marca Argovit, se promueve el crecimiento de la cebolla. Las nanopartículas pueden aumentar la activación de las vías enzimáticas y contribuir a la producción de metabolitos (Akhoundnejad y Karakaş, 2021). Asimismo, pueden acelerar el proceso de mitosis y, por lo tanto, incrementar el crecimiento de las raíces (Casillas-Figueroa *et al.*, 2020).

Sin embargo, concentraciones de AgNPs más altas pueden provocar efectos negativos. La concentración inhibitoria media para *Allium cepa* expuesta a AgNPs fue 46.01 mg/l. Algunas investigaciones reportan la liberación de iones de plata y la sobreproducción de especies reactivas de oxígeno como desencadenantes del daño celular (Cvjetko *et al.*, 2017; Casillas-Figueroa *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2023).

Otro factor que puede influir en la toxicidad es el tamaño de las nanopartículas. En la presente investigación se sintetizaron AgNPs de 20 nm en promedio, mientras que las AgNPs de la marca Argovit tienen un tamaño promedio de 35 ± 12 nm; y se ha reportado que las nanopartículas de menor tamaño presentan una mayor toxicidad (Casillas-Figueroa *et al.*, 2020). Scherer *et al.* (2019) reportan que las AgNPs pueden inhibir la mitosis de las células del tejido meristemático de *A. cepa*, provocando un menor crecimiento de sus raíces. La magnitud de este efecto fue inversamente proporcional al tamaño de las nanopartículas: las de 10 nm causaron un efecto antimitótico del 49% respecto al control, mientras que las de 70 nm causaron un efecto del 13%.

La concentración mínima inhibitoria (CMI) para las distintas especies de *Pseudomonas* fue entre 5 y 10 mg/l. Se inhibió el crecimiento de *Pseudomonas fluorescens* con una concentración de 5 mg/l de AgNPs, mientras que la CMI para *Pseudomonas putida* fue de 10 mg/l. Estos valores son similares a la CMI entre 1 a 4 mg/l para *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes* y *Staphylococcus aureus* reportada por Jiménez-Mejía *et al.* (2024). Sin embargo, se han reportado CMI de mayor magnitud para *E. coli*, *B. subtilis* y *S. aureus* con un intervalo de 20 a 200

mg/l. La concentración de inhibición fue variable respecto al tamaño de las AgNPs (Agnihotri *et al.*, 2014). También se ha reportado una CMI de 422 mg/l para *P. aeruginosa*, *S. aureus*, *Candida albicans*, *Acinetobacter baumannii* y *E. coli* (Zermeño-Mateus, 2023).

Las AgNPs de ≈ 10 nm pueden encontrarse en la superficie bacteriana y en el interior de la célula. Las nanopartículas interactuantes con la pared bacteriana pueden alterar la integridad estructural y afectar la permeabilidad de la membrana. Las AgNPs dentro de la célula pueden dañar biomoléculas esenciales como proteínas, lípidos y ADN, inhibir la replicación del ADN y bloquear la respiración celular, lo cual interfiere con el crecimiento y metabolismo bacteriano. También pueden inducir estrés oxidativo en las células bacterianas, dañando lípidos, proteínas y ADN, e incluso pueden provocar apoptosis (Agnihotri *et al.*, 2014; Salleh *et al.*, 2020).

Los resultados obtenidos en los bioensayos indican que la concentración de 9 mg/l de las AgNPs causó un efecto de inhibición del 10% (CI_{10}) en el crecimiento de las raíces de cebolla. Esta concentración es similar a la CMI para *P. putida* y *P. aeruginosa* y es casi del doble que la CMI para *P. fluorescens*. Estos resultados son importantes para valorar si es conveniente el uso de las AgNPs, pues podrían inhibir especies de *Pseudomonas* como: *P. fluorescens*, *P. aeruginosa* y *P. putida* que son benéficas para las plantas (Cano, 2011; Pérez-Álvarez *et al.*, 2015; Jain and Das, 2016; Velasco-Jiménez *et al.*, 2020; Sánchez-Carrillo y Guerra-Ramírez, 2022). Sin embargo, si *P. fluorescens* o *P. aeruginosa* actúan como un patógeno (Walker *et al.*, 2004; Pérez-Álvarez *et al.*, 2015), las AgNPs podrían representar una alternativa para el tratamiento e inhibir al fitopatógeno sin representar un gran impacto negativo sobre las plantas de cebolla. Si se busca inhibir el desarrollo de especies de *Pseudomonas* en *Allium cepa*, esto se puede conseguir con 10 mg/l de AgNPs, usando una concentración de 5 mg/l estimularía el desarrollo de las raíces de cebolla.

Esta investigación representa un primer acercamiento a la interacción entre *Allium cepa* con las AgNPs y entre algunas especies de *Pseudomonas* con las AgNPs. Todavía es necesario evaluar la interacción simultánea entre *Allium cepa*, bacterias y AgNPs, por lo cual es necesario realizar más estudios con el fin de obtener información que permita tomar decisiones en cuanto a las condiciones de aplicación de las AgNPs en los cultivos.

Aunque las AgNPs representen una alternativa para inhibir bacterias fitopatógenas también será necesario considerar el efecto negativo sobre bacterias benéficas en los cultivos. Especies de *Pseudomonas* como *P. fluorescens*, *P. aeruginosa* y *P. putida* favorecen el crecimiento vegetal (Pérez-Álvarez *et al.*, 2015; Jain y Das, 2016; Velasco-Jiménez *et al.*, 2020; Costa-Gutierrez *et al.*, 2022). Además, otras bacterias presentes en la microbiota del suelo pueden ser afectadas por las AgNPs y, en consecuencia, modificar la disponibilidad de los nutrientes requeridos por las plantas (Cvjetko *et al.*, 2017).

Es importante considerar las consecuencias ambientales al utilizar las nanopartículas en los cultivos. Estas partículas pueden permanecer en la tierra

de cultivo por mucho tiempo, planteando interrogantes sobre su posible acumulación en el medio ambiente y su impacto en los ecosistemas circundantes. Por lo anterior, resulta de suma importancia realizar diversos estudios que permitan entender la dinámica de las nanopartículas, su bioacumulación en organismos, sus efectos tóxicos e implicaciones en la salud humana (Tran *et al.*, 2024).

La aplicación de las AgNPs en la agricultura para el manejo de fitopatógenos se ha promovido recientemente como una opción innovadora y sustentable. Sin embargo, los mecanismos de migración de estas nanopartículas deben ser estudiados, así como la implementación de límites de concentración en suelo y agua para evitar los posibles daños a la salud humana y al ambiente (Ávila-Quezada *et al.*, 2024).

Aunque las AgNPs presentan actividad antibacteriana contra patógenos, también pueden inducir citotoxicidad y existe una creciente preocupación sobre el riesgo potencial a la salud pública relacionado con su uso. La aplicación y producción extensiva aumentaría su liberación en entornos acuáticos como ríos y lagos. En el agua dulce las AgNPs se oxidan en iones Ag^+ que son tóxicos para los organismos acuáticos. Además, la plata iónica se precipita como AgCl o Ag_2S . Al acumularse en organismos acuáticos, pueden entrar en el cuerpo humano a través de la cadena alimentaria. Sin embargo, se sabe poco sobre la seguridad a largo plazo y los efectos tóxicos de las AgNPs en el entorno acuático (Liao *et al.*, 2019). En caso de optar por estos materiales sobre los convencionales como el glifosato u otros, se visualiza que la opción es usar la menor concentración posible de nanopartículas de plata, para dar oportunidad de favorecer el crecimiento de los cultivos en cierto porcentaje, como lo muestra el presente estudio. Sin embargo, se deben estudiar las posibles afectaciones ecológicas en el ecosistema por el uso de las nanopartículas.

Conclusiones

La síntesis de nanopartículas de plata por la ruta química con borohidruro de sodio y citrato de sodio proporcionó nanopartículas que tienen un tamaño menor o igual a 20 nanómetros y con una forma esférica.

La concentración inhibitoria media (CI_{50}) y la concentración inhibitoria del 10% (CI_{10}) de las AgNPs para el desarrollo vegetal de *Allium cepa* fueron de 46.01 mg/l y 9 mg/l, respectivamente. La concentración mínima inhibitoria (CMI) para las especies de *Pseudomonas* fue de 5 a 10 mg/l de AgNPs. El uso de las AgNPs podría afectar a especies de *Pseudomonas* benéficas para las plantas, pero también se podrían emplear para controlar bacterias fitopatógenas si fuera necesario. La concentración que inhibe ligeramente las raíces de *Allium cepa* en un 10% ($\text{CI}_{10} = 9 \text{ mg/L}$) es similar a la que inhibe a *P. fluorescens* y *P. aeruginosa* potencialmente patógenas, esto resulta particularmente importante para combatir una enfermedad sin afectar el crecimiento de raíces de *Allium cepa*.

Es necesario profundizar en este tipo de estudios utilizando, en primera instancia, otras rutas de síntesis para las nanopartículas y estudiar su impacto en otras partes de la planta más allá de las raíces, así como durante la germinación de semillas. También es importante hacer bioensayos crónicos y con renovación considerando diferentes condiciones de temperatura e iluminación. Por último, se debe considerar estudiar la bioacumulación de nanopartículas en los tejidos de las plantas de cebolla y cómo impactan en los procesos metabólicos celulares.

Contribución de autorías

C. Juárez Salinas y C. L. Fernández Rendón: concepción y diseño del artículo, desarrollo metodológico, redacción del borrador original, revisión y edición final del texto.

E. Barrera Calva y P. Ramírez Romero: desarrollo metodológico y revisión final del texto.

R. I. Ventura Reyes: desarrollo metodológico, redacción del borrador original y revisión final del texto.

Referencias

- Acharya, P., Jayaprakash, G. K., Semper, J., Patil, B. S. (2020). ¹H nuclear magnetic resonance and liquid chromatography coupled with mass spectrometry-based metabolomics reveal enhancement of growth-promoting metabolites in onion seedlings treated with green-synthesized nanomaterials. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(46): 13206-13220. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00817>.
- Agnihotri, S., Mukherji, S., Mukherji, S. (2014). Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5-100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy. *RSC Advances*, 4(8): 3974-3983. <https://doi.org/10.1039/c3ra44507k>.
- Akhoundnejad, Y., Karakas, Ö. (2021). Responses of *Allium cepa* L. exposed to silver nanoparticles. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 5(4): 599-605. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2021.4.20>.
- Amirjani, A., Firouzi, F., Haghshenas, D. F. (2020). Predicting the size of silver nanoparticles from their optical properties. *Plasmonics*, 15(4): 1077-1082. <https://doi.org/10.1007/s11468-020-01121-x>.
- Ávila-Quezada, G. D., Valles-Aragón, M. C., Mercado-Meza, D. Y. (2024). Implicaciones bioéticas en la aplicación de nanopartículas de plata (AgNPs) para el manejo de fitopatógenos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 17(33), e69803. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.33.69803>.
- Baraka, A., Dickson, S., Gobara, M., El-Sayyad, G. S., Zorainy, M., Awaad, M. I., Hatem, H., Mokhtar, M., Tawfic, A. F. (2017). Synthesis of silver nanoparticles using natural pigments extracted from alfalfa leaves and its use for antimicrobial activity. *Chemical Papers*, 71: 2271-2281. <https://doi.org/10.1007/s11696-017-0221-9>.

- Budhani, S., Egboluche, N. P., Arslan, Z., Yu, H., Deng, H. (2019). Phytotoxic effect of silver nanoparticles on seed germination and growth of terrestrial plants. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 37(4): 330-355. <https://doi.org/10.1080/10590501.2019.1676600>.
- Cano, M. A. (2011). Interacción de microorganismos benéficos en plantas: micorrizas, *Trichoderma spp.* y *Pseudomonas spp.*: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14(2): 15-31. <https://doi.org/10.31910/rudca.v14.n2.2011.771>.
- Car, J., Krstulović, N. (2022). Analytical model for determination of size-distribution of colloidal silver nanoparticles from surface plasmon resonance wavelength and dielectric functions. *Nanomaterials*, 12(19): 3474. <https://doi.org/10.3390/nano12193474>.
- Casillas-Figueroa, F., Arellano-García, M. E., Leyva-Aguilera, C., Ruíz-Ruiz, B., Luna Vázquez-Gómez, R., Radilla-Chávez, P., Chávez-Santoscoy, R. A., Pestryakov, A., Toledano-Magaña, T., García-Ramos, J., Bogdanchikova, N. (2020). Argovit™ silver nanoparticles effects on allium cepa: plant growth promotion without cyto genotoxic damage. *Nanomaterials*, 10(7): 1386. <https://doi.org/10.3390/nano10071386>.
- Chen, S., Yan, X., Peralta-Videa, J. R., Su, Z., Hong, J., Zhao, L. (2023). Biological effects of AgNPs on crop plants: environmental implications and agricultural applications. *Environmental Science: Nano*, 10(1): 62-71. <https://doi.org/10.1039/d2en00801g>.
- Costa-Gutiérrez, S. B., Adler, C., Espinosa-Urgel, M., Ezequiel de Cristóbal, R. (2022). *Pseudomonas putida* and its close relatives: mixing and mastering the perfect tune for plants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106: 3351-3367. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11881-7>.
- Cvjetko, P., Milošić, A., Domijan, A.-M., Vrček, I. V., Tolić, S., Štefanić, P. P., Letofsky-Papst, I., Tkalec, M., Balen, B. (2017). Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 137: 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.11.009>.
- Das, R., Deb, P., Pandey, H., Shyam, P., Singh, D. (2022). Botanical synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) and its antifungal effect against *Alternaria porri* causing purple blotch of onion: an *in vitro* and natural epiphytic study. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10: 100390. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100390>.
- Díaz-Baez, M., Ronco, A. Pica-Granados, Y. (2008). Ensayo de toxicidad aguda con bulbos de cebolla *Allium cepa* L. mediante la evaluación de la inhibición del crecimiento promedio de raíces. En Ramírez-Romero, P. y Mendoza-Cantu, A. (comps.), *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, 33-40.
- Hamed, A. A., Kabary, H., Khedr, M., Emam, A. N. (2020). Antibiofilm, antimicrobial and cytotoxic activity of extracellular green-synthesized silver nanoparticles by two marine-derived actinomycete. *RSC Advances*, 10(17): 10361-10367. <https://doi.org/10.1039/c9ra11021f>.

- Jain, A., Das, S. (2016). Insight into the interaction between plants and associated fluorescent *Pseudomonas* spp. *International Journal of Agronomy*, 2016: 4269010. <https://doi.org/10.1155/2016/4269010>.
- Jiménez-Mejía, R., Ramírez-Herrera, A. D., Orozco-Ceja, J. A., González-Domínguez, M. I. (2024). Biosíntesis de nanopartículas de plata con actividad antimicrobiana por *Pseudomonas aeruginosa* ambiental. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 17(32): 1e-13e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69721>.
- Kumar, S., Masurkar, P., Sravani, B., Bag, D., Sharma K. R., Singh, P., Korra, T., Meena, M., Swapnil, P., Rajput, V. D., Minkina, T. (2023). A review on phytotoxicity and defense mechanism of silver nanoparticles (AgNPs) on plants. *Journal of Nanoparticle Research*, 25: 54. <https://doi.org/10.1007/s11051-023-05708-3>.
- Kupferschmied, P., Maurhofer, M., Keel, C. (2013). Promise for plant pest control: root-associated pseudomonads with insecticidal activities. *Frontiers in Plant Science*, 4: 287. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00287>.
- Larue, C., Castillo-Michel, H., Sobanska, S., Cécillon, L., Bureau, S., Barthès, V., Ouerdane, L., Carrière, M., Sarret, G. (2014). Foliar exposure of the crop *Lactuca sativa* to silver nanoparticles: evidence for internalization and changes in Ag speciation. *Journal of Hazardous Materials*, 264: 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.10.053>.
- Li, C. C., Dang, F., Li, M., Zhu, M., Zhong, H., Hintelmann, H., Zhou, D. M. (2017). Effects of exposure pathways on the accumulation and phytotoxicity of silver nanoparticles in soybean and rice. *Nanotoxicology*, 11(5): 699-709. <https://doi.org/10.1080/17435390.2017.1344740>.
- Liao, C., Li, Y., Tjong, S. C. (2019). Bactericidal and cytotoxic properties of silver nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(2): 449. <https://doi.org/10.3390/ijms20020449>.
- Muñoz-Rojas, J., Morales-García, Y. E., Baez-Rogelio, A., Quintero-Hernández, V., Rivera-Urbalejo, A. P., Pérez-y-Terrón, R. (2016). Métodos económicos para la cuantificación de microorganismos. En *Instituciones de educación superior. La labor investigadora e innovadora en México*. Science Associated Editors, L. L. C., Cheyenne, WY, 67-82.
- Nie, P., Zhao, Y., Xu, H. (2023). Synthesis, applications, toxicity and toxicity mechanisms of silver nanoparticles: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 253: 114636. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114636>.
- Palencia, S. L., Combatt, E. M., Palencia, M. S. (2013). Toxicidad de nanopartículas inorgánicas sobre los microorganismos del suelo con importancia agrícola. una revisión. *Temas Agrarios*, 18(2): 106-122.
- Pascual-Hernández, M. F. (2025). *Aislamiento e identificación de bacterias presentes en el agua de la cisterna de una universidad*. Informe de servicio social, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. [Manuscrito no publicado].
- Pastelín-Solano, M. C., Ramírez-Mosqueda, M. A., Bogdanchikova, N., Castro-González, C. G., Bello-Bello, J. J. (2020). Silver nanoparticles affect the micropropagation of vanilla (*Vanilla planifolia* Jacks ex Andrews). *Agrociencia*, 54: 1-13.

- Pérez-Álvarez, S., Coto-Arbelo, O., Echemendía-Pérez, M., Ávila-Quezada, G. (2015). *Pseudomonas fluorescens* Migula, ¿control biológico o patógeno? *Revista de Protección Vegetal*, (3): 225-234.
- Rehal, R. K., Manoswini, M., Panda, A., Majumdar, A. G., Mahapatra, P. K., Mohanty, P. S. (2023). Color-tunable silver nanoparticles: synthesis, characterizations, and its antimicrobial activity. *Bionanoscience*, 13(4): 2448-2457. <https://doi.org/10.1007/s12668-023-01127-9>.
- Rojas-Avelizapa, N. G., Regalado-Infante, P. E., Dávila-Lezama, M. del R., Llerena-Hernández, R. C., Rojas-Avelizapa, L. I. (2020). Actividad antimicrobiana de nanopartículas de plata contra bacterias fitopatógenas. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 8(2): 1-7. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v8i2.173>.
- Salleh, A., Naomi, R., Utami, N. D., Mohammad, A. W., Mahmoudi, E., Mustafa, N., Fauzi, M. B. (2020). The potential of silver nanoparticles for antiviral and anti-bacterial applications: a mechanism of action. *Nanomaterials*, 10(8): 1566. <https://doi.org/10.3390/nano10081566>.
- Sánchez-Carrillo, R., Guerra-Ramírez, P. (2022). *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(4): 715-725. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.2799>.
- Sanguineto, P. (2023). *Nanopartículas biogénicas a partir de Trichoderma spp. y su aplicación en el control de fitopatógenos de arroz y trigo*. Tesis de maestría. Universidad de la Republica Uruguay, Repositorio institucional UDELAR.
- Scherer, M. D., Sposito, J. C., Falco, W. F., Grisolia, A. B., Andrade, L. H. C., Lima, S. M., Machado, G., Nascimento, V. A., Gonçalves, D. A., Wender, H., Oliveira, S. L., Caires, A. R. L. (2019). Cytotoxic and genotoxic effects of silver nanoparticles on meristematic cells of *Allium cepa* roots: a close analysis of particle size dependence. *Science of the Total Environment*, 660: 459-467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.444>.
- Singh, D., Kumar, A. (2020). Binary mixture of nanoparticles in sewage sludge: impact on spinach growth. *Chemosphere*, 254, 126794. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126794>.
- Sivaramakrishnan, M., Jagadeesan Sharavanan, V., Karaiyagowder Govindarajan, D., Meganathan, Y., Devaraj, B. S., Natesan, S., Kothandan, R., Kandaswamy, K. (2019). Green synthesized silver nanoparticles using aqueous leaf extracts of *Leucas aspera* exhibits antimicrobial and catalytic dye degradation properties. *SN Applied Sciences*, 1(3): 1-8. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0221-1>.
- Thiruvengadam, V., Bansod, A. V. (2020). Characterization of silver nanoparticles synthesized using chemical method and its antibacterial property. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 10: 7257-7264. <https://doi.org/10.33263/BRI-AC106.72577264>.
- Tran, T.-K., Nguyen, M.-K., Lin, C., Hoang, T.-D., Nguyen, T.-C., Lone, A. M., Khedulkar, A. P., Gaballah, M. S., Singh, J., Chung, W. J., Nguyen, D. D. (2024). Review on fate, transport, toxicity and health risk of nanoparticles in natural ecosystems: emerging challenges in the modern age and solutions toward a

- sustainable environment. *Science of The Total Environment*, 912(20): 169331. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169331>.
- Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38(2): 333-345. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>.
- Walker, T. S., Bais, H. P., Déziel, E., Schweizer, H. P., Rahme, L. G., Fall, R., Vivanco, J. M. (2004). *Pseudomonas aeruginosa*-plant root interactions. Pathogenicity, biofilm formation, and root exudation. *Plant Physiology*, 134(1): 320-331. <https://doi.org/10.1104/pp.103.027888>.
- Wang, P., Menzies, N. W., Dennis, P. G., Guo, J., Forstner, C., Sekine, R., Lombi, E., Kappen, P., Bertsch, P. M., Kopittke, P. M. (2016). Silver nanoparticles entering soils via the wastewater-sludge-soil pathway pose low risk to plants but elevated Cl concentrations increase Ag bioavailability. *Environmental Science & Technology*, 50(15): 8274-8281. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01180>.
- Yan, A., Chen, Z. (2019). Impacts of silver nanoparticles on plants: a focus on the phytotoxicity and underlying mechanism. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(5): 1003. <https://doi.org/10.3390/ijms20051003>.
- Zar, J. H. (2019). *Biostatistical analysis*. Pearson Education, Incorporated.
- Zermeño-Mateus, D. (2023). *Síntesis verde de nanopartículas de plata (AgNPs) con actividad antimicrobiana*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Metropolitana.