



**Biosíntesis de nanopartículas de plata a partir de extracto de cáscara de *Musa sp.*:  
Evaluación de su eficacia antifúngica e influencia en el desarrollo *in vitro* de *Musa sp.***

Juan David Cantillo Torres

Semestre de industria

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Bioquímico

Asesoras

Laura Pinilla Mendoza, Doctor (PhD) en Biotecnología

Yennifer Hinestroza Durango, Ingeniera Bioquímica

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Bioquímica  
Carepa, Antioquia, Colombia

2024

---

Cita	Cantillo Torres [1]
<b>Referencia</b> Estilo IEEE (2020)	[1] J. D. Cantillo Torres, “Biosíntesis de nanopartículas de plata a partir de extracto de cáscara de <i>Musa sp.</i> : Evaluación de su eficacia antifúngica e influencia en el desarrollo <i>in vitro</i> de <i>Musa sp.</i> ”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Bioquímica, Universidad de Antioquia, Carepa, Antioquia, Colombia, 2024.

---



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/director:** Julio César Saldarriaga Molina.

**Jefe departamento:** Lina María Gonzáles Rodríguez.

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

---

## **Dedicatoria**

Esta investigación es dedicada a mi abuela Adriana Álvarez, la cual me mostró que el amor verdadero se manifiesta en los actos más simples y en los más profundos. La calidez de sus abrazos y sus palabras de consuelo eran un refugio seguro en tiempos de incertidumbre. Honro su memoria y su legado.

## **Agradecimientos**

Tengo muchas personas especiales que debo agradecer por su apoyo y por darme ánimos durante estos 5 años de carrera. Agradezco a mi familia, en especial a mi madre Rosmery y a mi hijo Mike por su apoyo, por su comprensión y su confianza depositada en mí. A mis compañeros de carrera por todo el apoyo mutuo que nos dimos, especialmente a mis grandes amigos y compañeros Yasser Torres, Felipe Giraldo y Christian Jaraba.

Agradezco a las asesoras más excepcionales que jamás hubiese podido tener, la profesora Laura Pinilla y a la Ingeniera Yennifer Hinestroza, gracias por sus orientaciones y por haberme brindado las diferentes herramientas para llevar a cabo esta investigación. Agradezco a mis profesores de carrera, en especial a Luis Carlos Aristizábal, Natalia Gómez, Estela Monsalve, Mauricio Sierra, Jerónimo Osorio y a todos aquellos que me hicieron tener pasión por las ciencias y la educación, sin ustedes no sería el profesional en el que me he convertido.

Gratitud a Alejandra quien fue mi amor, he aquí el cumplimiento de mi promesa. A mis amigos cercanos quienes me apoyaron y me animaron, en especial a Nohe Mosquera, Paola Ríos, Yulieth Montes, Kelly Guevara, Luisa Jalal, Ana Graciano, Juan Puerta, Faleidy Echavarría. Gracias por ser esas personas que me motivaron cuando más lo necesitaba.

Con todo cariño para todos los que mencioné, esta investigación es para ustedes.

TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	9
<b>ABSTRACT</b> .....	10
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	13
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b> .....	14
<b>IV. OBJETIVOS</b> .....	15
A. Objetivo general.....	15
B. Objetivos específicos.....	15
<b>V. MARCO TEÓRICO</b> .....	16
<b>5.1. Antecedentes</b> .....	16
<b>5.2. Base teórica</b> .....	18
<b>5.2.1. Nanopartículas de plata</b> .....	18
5.2.1.1. Síntesis de nanopartículas de plata.....	18
5.2.1.2. Teoría de Mie.....	19
5.2.1.3. Cálculo de la concentración de AgNPs.....	20
5.2.1.4. Algunas técnicas de caracterización de AgNPs.....	21
<b>5.2.2. Algunos hongos patógenos que afectan las plantaciones de banano.</b> .....	22
5.2.2.1. <i>Mycosphaerella fijiensis</i> .....	22
5.2.2.2. <i>Lasiodiplodia theobromae</i> .....	23
5.2.2.3. <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> .....	23
<b>5.2.3. Generalidades de <i>Musa acuminata</i></b> .....	24
<b>5.2.4. Cultivo <i>in vitro</i></b> .....	25
<b>VI. METODOLOGÍA</b> .....	26

---

<b>6.1. Preparación de extracto de cáscara de <i>Musa sp.</i></b> .....	26
<b>6.2. Biosíntesis de nanopartículas de plata</b> .....	26
6.2.1. Caracterización de nanopartículas de plata.....	26
6.2.2. Diseño experimental: Síntesis de AgNPs .....	27
<b>6.3. Evaluación de actividad antifúngica de AgNPs</b> .....	27
6.3.1. Evaluación de actividad antifúngica por halos de inhibición .....	27
6.3.2. Prueba de sensibilidad por tubos germinativos.....	28
<b>6.4. Evaluación de nanopartículas de plata en cultivo <i>in vitro</i> de <i>Musa sp.</i></b> .....	29
6.4.1. Recolección, corte y desinfección del material vegetal .....	29
6.4.2. Preparación de medios de cultivo <i>in vitro</i> enriquecidos con AgNPs.....	30
6.4.3. Diseño experimental: Influencia de AgNPs en el desarrollo <i>in vitro</i> de <i>Musa sp.</i> .....	30
<b>VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	31
<b>7.1. Formación de nanopartículas de plata a partir de extracto de cáscara de <i>Musa sp.</i></b> ...	31
7.1.2. Caracterización espectrofotométrica UV-VIS de nanopartículas de plata.....	31
7.1.3. Análisis estadístico: Síntesis verde de AgNPs.....	33
7.1.4. Análisis espectrofotométrico UV-VIS .....	35
7.1.5. Caracterización por dispersión de luz dinámica (DLS).....	36
7.1.6. Caracterización de infrarrojos por transformada de Fourier (FT-IR) .....	37
<b>7.2. Evaluación de actividad antifúngica de AgNPs frente a hongos asociados al cultivo musáceos</b> .....	38
<b>7.3. Evaluación de AgNPs en el desarrollo <i>in vitro</i> de <i>Musa sp.</i></b> .....	42
7.3.1. Análisis estadístico: Influencia de AgNPs en el desarrollo <i>in vitro</i> de <i>Musa sp.</i> .....	43
<b>VIII. CONCLUSIONES</b> .....	46
<b>ANEXOS</b> .....	58

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA I.</b> DIÁMETROS DE NANOPARTICULAS DE PLATA REPORTADOS A PARTIR DE SU RESONANCIA DE PLASMÓN .....	20
<b>TABLA II.</b> TAXONOMÍA <i>Mycosphaerella fijiensis</i> .....	22
<b>TABLA III.</b> TAXONOMÍA <i>Lasiodiplodia theobromae</i> .....	23
<b>TABLA IV.</b> TAXONOMÍA <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> .....	24
<b>TABLA V.</b> ANOVA PARA LA VARIABLE RESPUESTA ÁREA BAJO LA CURVA.....	33
<b>TABLA VI.</b> EFICACIA INHIBITORIA DE AgNPs FRENTE A <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> .....	39
<b>TABLA VII.</b> EFICACIA INHIBITORIA DE AgNPs FRENTE A <i>Lasiodiplodia theobromae</i> ..	40
<b>TABLA VIII.</b> EFICACIA INHIBITORIA DE AgNPs FRENTE A <i>Pseudocercospora fijiensis</i> . .....	41
<b>TABLA IX.</b> EFECTO DE LAS AgNPs EN EL DESARROLLO IN VITRO DE <i>Musa sp.</i> .....	42
<b>TABLA X.</b> ANOVA PARA LA VARIABLE RESPUESTA ALTURA Y NÚMERO DE BROTES.....	43
<b>TABLA XI.</b> PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS (TUKEY) PARA LA VARIABLE ALTURA. ....	44

## LISTA DE FIGURAS

<b>Fig. 1</b> Representación de síntesis verde de AgNPs. ....	19
<b>Fig. 2</b> Formación de AgNPs a partir de extracto vegetal posterior a 24 horas. ....	31
<b>Fig. 3</b> Espectros UV-VIS de AgNPs sintetizadas variando concentración de sal precursora y temperatura. <b>a)</b> 0.5 mM de AgNO <sub>3</sub> , <b>b)</b> 1.0 mM de AgNO <sub>3</sub> y <b>c)</b> 1.5 mM de AgNO <sub>3</sub> . ....	32
<b>Fig. 4</b> Superficie de respuesta estimada en la biosíntesis de AgNPs. ....	34
<b>Fig. 5</b> DLS del tratamiento T <sub>6</sub> (1.0 mM; 90 °C). ....	36
<b>Fig. 6</b> Espectro FTIR <b>(a)</b> AgNPs y <b>(b)</b> Extracto de cáscara de <i>Musa sp.</i> ....	37
<b>Fig. 7</b> Ensayo antifúngico de AgNPs frente a <i>colletotrichum gloesporoides</i> . <b>a)</b> Control. <b>b)</b> AgNPs 1 mL. <b>c)</b> AgNPs 3 mL. <b>d)</b> AgNPs 5 mL. <b>e)</b> AgNPs 7 mL. ....	38
<b>Fig. 8</b> Ensayo antifúngico de AgNPs frente a <i>Lasiodiplodia theobromae</i> . <b>a)</b> Control. <b>b)</b> AgNPs 1 mL. <b>c)</b> AgNPs 3 mL. <b>d)</b> AgNPs 5 mL. <b>e)</b> AgNPs 7 mL. ....	39
<b>Fig. 9</b> Ensayo antifúngico de AgNPs por tubos germinativos en <i>Pseudocercospora fijiensis</i> . <b>a)</b> Control. <b>b)</b> AgNPs 1 mL. <b>c)</b> AgNPs 3 mL. <b>d)</b> AgNPs 5 mL. <b>e)</b> AgNPs 7 mL. ....	40
<b>Fig. 10</b> Cultivo <i>in vitro</i> de <i>Musa sp.</i> con adición de AgNPs. <b>a)</b> Control. <b>b)</b> 0 mL de AgNPs. <b>c)</b> 1 mL AgNPs. <b>d)</b> 3 mL de AgNPs. <b>e)</b> 5 mL de AgNPs. <b>f)</b> 7 mL de AgNPs. ....	42
<b>Fig. 11</b> Gráfico de diagrama de Pareto estandarizado. ....	58
<b>Fig. 12</b> Selección de material vegetal, corte de corno y siembra en medio de cultivo. ....	58
<b>Fig. 13</b> Cultivo vegetal obtenido posterior a 2 meses sin adición de AgNPs ....	58

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>AgNPs</b>	Nanopartículas de plata
<b>AgNO<sub>3</sub></b>	Nitrato de plata
<b>Cm</b>	Centímetro
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>FT-IR</b>	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier
<b>mL</b>	Mililitros
<b>MS</b>	Murashige y Skoog
<b>nM</b>	Nanomolar
<b>No</b>	Número
<b>NPs</b>	Nanopartículas
<b>PDA</b>	Agar Patata-Dextrosa
<b>PhD</b>	Philosophiae Doctor
<b>SPR</b>	Resonancia de plasmón superficial
<b>Sp</b>	Especie
<b>Spp</b>	Especies
<b>TEM</b>	Microscopio Electrónico de Transmisión
<b>Tto</b>	Tratamiento
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia
<b>UV-VIS</b>	Ultravioleta visible

## RESUMEN

El banano es el principal bien globalizado, siendo el fruto más exportado y consumido mundialmente. A pesar de su importancia económica, la industria bananera enfrenta retos significativos, como la presencia de hongos patógenos que afectan gravemente el cultivo. La síntesis biológica de nanopartículas de plata (AgNPs) emerge como una estrategia prometedora para controlar estos patógenos. En el cultivo de banano, la propagación vegetativa mediante cormos enfrenta desafíos como la baja tasa de multiplicación y el aumento de plagas. La propagación *in vitro* se presenta como una alternativa crucial para obtener plantas saludables y libres de patógenos. Además, se ha observado que las AgNPs pueden estimular el crecimiento y desarrollo de tejidos vegetales, lo que podría acelerar la micropropagación. Este estudio tuvo como objetivo determinar las condiciones ideales para la biosíntesis de AgNPs a partir de AgNO<sub>3</sub> y extracto de cáscara de *Musa sp.*, evaluar su eficacia inhibitoria en hongos patógenos del banano y su influencia en el desarrollo *in vitro* de *Musa sp.* Se halló una síntesis óptima con 1 mM de AgNO<sub>3</sub> a 90 °C, obteniendo nanopartículas con un diámetro de 62 nm, determinado mediante DLS, y confirmada la reducción de Ag<sup>+</sup> a Ag<sup>0</sup> por espectrofotometría UV-VIS y FT-IR. Las AgNPs mostraron una eficacia inhibitoria del 84 % contra *Colletotrichum gloeosporioides*, del 54,9 % contra *Lasiodiplodia theobromae* y del 94,7 % contra *Pseudocercospora fijiensis*. Además, a una concentración de 2.67 nM, las AgNPs favorecieron la elongación del pseudotallo en el cultivo *in vitro* de *Musa sp.*

**Palabras clave** — nanopartículas de plata, cultivo *in vitro*, *Musa sp.*, eficacia, biosíntesis.

---

## ABSTRACT

Bananas are the main globalized good, being the most exported and consumed fruit worldwide. Despite its economic importance, the banana industry faces significant challenges, such as the presence of pathogenic fungi that seriously affect the crop. The biological synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) emerges as a promising strategy to control these pathogens. In banana cultivation, vegetative propagation through corms faces challenges such as low multiplication rate and increase in pests. *In vitro* propagation is presented as a crucial alternative to obtain healthy and pathogen-free plants. Furthermore, it has been observed that AgNPs can stimulate the growth and development of plant tissues, which could accelerate micropropagation. This study aimed to determine the ideal conditions for the biosynthesis of AgNPs from AgNO<sub>3</sub> and *Musa sp.* peel extract, evaluate its inhibitory efficacy on banana pathogenic fungi and its influence on the *in vitro* development of *Musa sp.* An optimal synthesis was found with 1 mM AgNO<sub>3</sub> at 90 °C, obtaining nanoparticles with a diameter of 62 nm, determined by DLS, and the reduction of Ag<sup>+</sup> to Ag<sup>0</sup> was confirmed by UV-VIS and FT-IR spectrophotometry. The AgNPs showed an inhibitory efficiency of 84 % against *Colletotrichum gloeosporioides*, 54.9 % against *Lasiodiplodia theobromae* and 94.7 % against *Pseudocercospora fijiensis*. Furthermore, at a concentration of 2.67 nM, the AgNPs favored pseudostem elongation in the *in vitro* culture of *Musa sp.*

**Keywords** — Silver nanoparticles, *in vitro* culture, efficacy, *Musa sp.*, biosynthesis.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el banano se erige como el principal bien globalizado, siendo el fruto más ampliamente exportado y consumido, lo cual lo convierte en un elemento preponderante en los intercambios comerciales internacionales [1]. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la demanda mundial de banano ha experimentado un notable crecimiento en las últimas décadas, superando los 150 millones de toneladas anuales de consumo a nivel global [2]. Colombia destaca como uno de los principales productores y exportadores de banano, ocupando el cuarto puesto como mayor exportador mundial, enviando más de 2 millones de toneladas al extranjero en 2022 [3]. A pesar de su importancia económica, la industria bananera enfrenta desafíos significativos, incluyendo la presencia de hongos patógenos como la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*), la cual se manifiesta mediante una decoloración gradual de las hojas, seguida de necrosis y posteriormente, un secado con tonalidad café. Este proceso impide que la planta realice una fotosíntesis efectiva, afectando el desarrollo de los frutos, que se vuelven pequeños y con valores nutricionales bajos, lo que dificulta su exportación [4],[5]. También enfermedades de pudrición de corona (*Colletotrichum sp*, *Lasiodiplodia theobromae*, entre otras), que amenazan la calidad y productividad de los cultivos a nivel mundial [6]. Ante esta situación, la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles para el control de estos patógenos se ha convertido en una prioridad para la comunidad científica y el sector agrícola.

La síntesis biológica de nanopartículas de plata (AgNPs) emerge como una estrategia altamente prometedora para el control de patógenos en diversos cultivos, incluyendo el banano. La utilización de extractos vegetales en este proceso no solo es respetuosa con el medio ambiente, sino que también se postula como una alternativa potencialmente más económica en comparación con los métodos convencionales de síntesis. Este enfoque biológico aprovecha los compuestos bioactivos presentes en los extractos vegetales para reducir los iones de plata, lo que conduce a la formación de nanopartículas con propiedades antimicrobianas [7]. La aplicación de AgNPs como nanofertilizante y nanofungicida no solo representa una innovación significativa en el campo agrícola, sino que también ofrece un enfoque sostenible y altamente eficaz para hacer frente a los desafíos fitosanitarios que amenazan las plantaciones de banano. Mediante esta tecnología, es

---

posible fortalecer las defensas de las plantas contra patógenos como la Sigatoka negra y otras enfermedades de pudrición que afectan la productividad y la calidad de los cultivos de banano [8].

Por otra parte, es fundamental destacar que, en el ámbito del cultivo de banano, donde la propagación vegetativa a través de cormos es la práctica tradicional, se han presentado desafíos como la baja tasa de multiplicación y el incremento de plagas. La propagación *in vitro* surge también como una alternativa crucial para obtener plantas saludables y libres de patógenos, en adición, se ha observado que las AgNPs pueden estimular el crecimiento y desarrollo de los tejidos vegetales, lo que podría resultar en una micropropagación más rápida y vigorosa [9]. La incorporación de nanopartículas de plata (AgNPs) en el cultivo *in vitro* no solo podría abordar los problemas fitosanitarios asociados con los métodos convencionales, sino también promover un crecimiento más eficiente y saludable [10].

En este contexto, el presente estudio consistió en evaluar la actividad antifúngica de las nanopartículas de plata sintetizadas mediante extractos de cáscara de *Musa sp.* contra los hongos, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Lasiodiplodia theobromae*, *Pseudocercospora fijiensis* con el fin de contribuir al desarrollo de alternativas sostenibles para el control de enfermedades en este cultivo. Además, se exploró la concentración de AgNPs que favorezca el desarrollo *in vitro* de *Musa sp.*, considerando el potencial del cultivo *in vitro* como una herramienta clave para la micropropagación y conservación de variedades genéticas importantes en la industria bananera. La combinación innovadora de la síntesis biológica de AgNPs utilizando extractos de *Musa sp.* y su aplicación en cultivo *in vitro*, podría ofrecer perspectivas prometedoras para el desarrollo sostenible del sector agrícola.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria bananera se encuentra confrontada con desafíos considerables derivados de la presencia de patógenos como la Sigatoka negra y las enfermedades de pudrición de corona, las cuales ejercen un efecto adverso en la productividad y calidad de los cultivos de banano. La Sigatoka negra, originada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis*, ocasiona una progresiva degradación, necrosis y secado de las hojas, resultando en una disminución de la fotosíntesis y en una reducción del tamaño y valor nutricional de los frutos, dificultando así su comercialización [11]. Por otro lado, la pudrición de la corona, una afección postcosecha global que afecta a los frutos de bananos y plátanos, se atribuye a diversos patógenos como *Fusarium spp.*, *Acremonium spp.*, *Verticillium sp.*, *Colletotrichum musae*, *Lasiodiplodia theobromae* y *Curvularia sp.* Esta enfermedad compromete la calidad de la fruta, disminuyendo su aceptación en el mercado y ocasionando pérdidas económicas para los productores. Además, la utilización limitada y problemática de fungicidas químicos para su control plantea serias preocupaciones ambientales y de salud pública [12].

A este panorama se suma la alta demanda global de plátanos, con aproximadamente 48 millones de toneladas de plátanos y 27 millones de toneladas de bananos producidas anualmente, consolidándolos como alimentos básicos indispensables en las regiones tropicales [13], [14]. Colombia, en particular, se posiciona como el quinto mayor productor de banano a nivel mundial, enfrentando desafíos adicionales como la reducción de las áreas plantadas debido a condiciones climáticas adversas y la necesidad imperiosa de incrementar la producción de plantas de banano [15].

En consecuencia, es crucial desarrollar estrategias innovadoras y sostenibles para mitigar estos problemas, preservando la viabilidad económica de la industria y asegurando el suministro estable de este importante cultivo a nivel global.

### III. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio se fundamenta en la urgente necesidad de desarrollar métodos sostenibles y altamente efectivos para el manejo de enfermedades en la industria bananera. Las nanopartículas de plata (AgNPs) han surgido como una solución potencialmente viable para mitigar los devastadores efectos de las enfermedades fúngicas en los cultivos de banano, con el objetivo de mejorar la productividad, calidad y competitividad del sector. La utilización de extractos naturales de la cáscara de *Musa sp.* para la síntesis de AgNPs subraya la importancia de encontrar alternativas más seguras y eco-amigables que los fungicidas químicos convencionales.

Además, este estudio se incluyó el cultivo *in vitro* de *Musa sp.* como una alternativa innovadora para contribuir a una agricultura más eficiente, facilitando una mayor tasa de multiplicación de plantas sanas y libres de enfermedades. La combinación de AgNPs obtenidas a partir de extractos de *Musa sp.* con el cultivo *in vitro* ofrece un enfoque integrador que promueve prácticas agrícolas más sustentables y resilientes.

Es crucial destacar que estos avances no solo tendrían implicaciones positivas en términos de productividad agrícola, sino que también impactarían significativamente en aspectos socioeconómicos y ambientales. Socioeconómicamente, mejorar la salud de los cultivos puede aumentar los ingresos de los productores, fortalecer la estabilidad financiera de las regiones dependientes del cultivo de banano y generar más empleo. Ambientalmente, la reducción en el uso de fungicidas químicos disminuye la contaminación del suelo y del agua, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles y conservando los recursos naturales.

## IV. OBJETIVOS

### ***A. Objetivo general***

Determinar la actividad antifúngica de nanopartículas de plata generadas por síntesis biológica con extractos de cáscara de *Musa sp.*, e identificar la concentración que contribuya al desarrollo *in vitro* de esta planta.

### ***B. Objetivos específicos***

- Sintetizar y caracterizar nanopartículas de plata a partir de cáscara de *Musa sp.*, variando concentración del precursor  $\text{AgNO}_3$  y temperatura, con el fin de encontrar condiciones ideales de síntesis.
- Analizar la actividad antifúngica de las nanopartículas de plata mediante prueba de sensibilidad, utilizando diferentes volúmenes frente a cepas de *Lasiodiplodia theobromae*, *Pseudocercospora fijiensis* y *Colletotrichum gloeosporioides*.
- Determinar la concentración de nanopartículas de plata que favorezca el desarrollo *in vitro* de *Musa sp.*, mediante la evaluación de los parámetros: número de brotes y altura del pseudotallo.

## V. MARCO TEÓRICO

### 5.1. Antecedentes

La Sigatoka negra, causada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis Anamorfo (Pseudocercospora fijiensis)*, es la afección foliar de mayor trascendencia que afecta a los cultivos de plátano y banano a escala global. Esta patología puede resultar en pérdidas de rendimiento de hasta el 100 % si no se aplican medidas adecuadas para su control y manejo [16].

Por otro lado, la principal patología que afecta al plátano después de la cosecha es la pudrición de la corona y se asocia a patógenos como: *Fusarium spp.*; *Acremonium spp.*; *Verticillium sp.*; *Colletotrichum musae* y *Curvularia sp.* Este trastorno se manifiesta inicialmente mediante un ablandamiento de los tejidos superficiales ubicados en los restos del raquis y en la corona o base del fruto, los cuales adquieren una tonalidad marrón oscuro o negra que puede extenderse hasta comprometer los pedicelos e incluso los dedos individuales en situaciones de mayor gravedad [12],[17].

Tradicionalmente, el control de la pudrición de la corona y otras patologías del banano ha utilizado sulfato amónico de aluminio en el agua de lavado y fungicidas como el thiabendazole o benzimidazole, cuya concentración varía según el destino de exportación. La remoción de brácteas de flores no funcionales también ha contribuido al control, ya que estas estructuras favorecen el desarrollo de conidios y esporas. En el cultivo orgánico, se han explorado alternativas como biopesticidas de origen vegetal y extractos cítricos, destacándose el extracto de toronja como eficaz desinfectante del agua de lavado y controlador de la pudrición de la corona mediante la inmersión de los clústeres de bananos. [18], [19], [20].

Se han explorado alternativas para mitigar enfermedades en el cultivo de banano, destacándose el uso de nanopartículas metálicas. Las investigaciones recientes han incorporado nanopartículas de plata (AgNPs) para reducir la dependencia de pesticidas convencionales, observándose su utilidad como fertilizantes que mejoran la germinación de semillas y los procesos fotosintéticos. Este enfoque ha ganado interés por las propiedades antibacterianas, catalíticas, conductivas y estables

de las AgNPs. [21], [22]. Se ha encontrado que, las AgNPs con una forma esférica y un diámetro cercano a los 50 nm demostraron ser eficaces en el control de la marchitez del garbanzo ocasionada por *Fusarium oxysporum* [21]. Además, se examinó la capacidad antifúngica y antibacteriana de las nanopartículas de plata influenciadas por hongos. Los hallazgos revelaron la efectividad antimicrobiana de las nanopartículas de plata contra diversos microorganismos patógenos, incluyendo *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, *Enterobacter aerogenes* y *Trichoderma sp.*, especialmente a concentraciones más elevadas [23].

Es trascendental destacar que, se están desarrollando metodologías alternativas para la síntesis de AgNPs, como la síntesis verde, que aprovechan organismos naturales como bacterias, hongos y plantas para la producción ecológica de nanopartículas metálicas. Estos esfuerzos buscan reducir la necesidad de utilizar productos químicos [24].

Se han realizado estudios que demuestran la eficacia de la síntesis verde en la producción de nanopartículas metálicas. Por ejemplo, Tamilarasi [24] utilizó extracto de hojas de *Gomphrena globosa* para sintetizar AgNPs plata que mostraron actividad antibacteriana contra varias cepas, incluyendo *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*. De manera similar, Mahendran [22] empleó extracto de hojas de *Cissus quadrangularis* para la biosíntesis de AgNPs con propiedades antibacterianas frente a *Bacillus subtilis* y *Klebsiella pneumoniae*.

Las nanopartículas metálicas han despertado considerable interés en la agricultura por su utilidad en el mejoramiento de cultivos, la fertilización del suelo y el control de plagas. Se ha investigado su capacidad antibiótica en medios de cultivo, y se ha encontrado que concentraciones bajas de estas partículas tienen efectos positivos en cultivos de plantas *in vitro* [25], [26]. Por ejemplo, estudios de Giap [27], han demostrado que concentraciones entre 1 ppm y 5 ppm de AgNPs promueven el desarrollo de brotes y el alargamiento del tallo, aumentando la biomasa. Sin embargo, concentraciones más altas, como 7 ppm, pueden tener efectos fitotóxicos y reducir el desarrollo foliar.

Un estudio realizado en Egipto evaluó los efectos de diferentes concentraciones de nanopartículas de plata (AgNPs) e iones de plata en plántulas de banano *Musa acuminata*. Se determinó que concentraciones de AgNPs entre 1 y 5 ppm tuvieron efectos positivos en el crecimiento de las plántulas [28]. Además, se encontró que las AgNPs son menos tóxicas que los iones de plata [29]. Se sugiere que la reducción del crecimiento en las plantas tratadas con los iones de plata podría atribuirse a una disminución en el índice mitótico.

## **5.2. Base teórica**

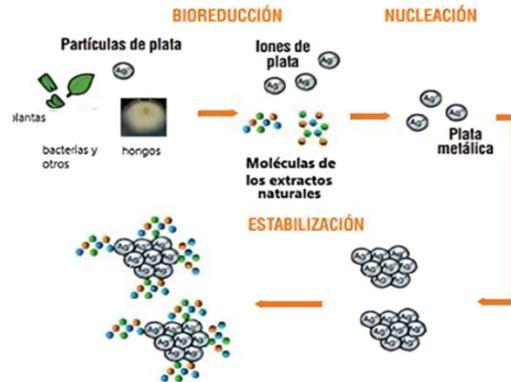
### **5.2.1. Nanopartículas de plata**

Las nanopartículas (NPs) son partículas con dimensiones que oscilan entre 1 y 100 nanómetros [30]. La composición y propiedades de las NPs son sumamente variadas debido a la diversidad de materiales a partir de los cuales se generan. Entre estos materiales se incluyen el quitosano, metales, óxidos metálicos y lípidos [31]. Las NPs exhiben una amplia variedad de formas, las cuales son determinadas por los métodos de síntesis empleados y los materiales utilizados. Entre las formas más reconocidas se incluyen nanocables, cristales, esferas, agujas, y otras estructuras distintivas [32]. Las AgNPs con una morfología esférica son las más prevalentes y suelen estar envueltas por moléculas simples como el citrato de sodio, o macromoléculas como polímeros neutros o polielectrolitos. Estas capas de recubrimiento proporcionan estabilidad a las partículas, evitando su agregación [33].

#### **5.2.1.1. Síntesis de nanopartículas de plata.**

Los métodos de preparación de nanopartículas de plata (AgNPs) se pueden clasificar en tres categorías: métodos top-down, métodos bottom-up y métodos biológicos. Los métodos top-down utilizan procesos físicos, como la molienda, para reducir el tamaño de las partículas. Los métodos bottom-up se basan en procesos químicos en solución coloidal, donde las partículas se forman a partir de una solución. Por último, los métodos biológicos emplean organismos vivos o extractos biológicos para sintetizar las nanopartículas [34].

Este último enfoque, conocido como síntesis verde de nanopartículas, aprovecha las propiedades redox de la maquinaria enzimática presente en microorganismos, hongos y extractos vegetales como se denota en la **Fig. 1**. Este método se utiliza para producir nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos [32].



**Fig. 1** Representación de síntesis verde de AgNPs.

**Nota:** Fuente [35].

### 5.2.1.2. Teoría de Mie

La teoría de Mie, desarrollada por Gustav Mie en 1908, ofrece una explicación detallada sobre cómo la luz interactúa con nanopartículas metálicas, centrándose en partículas esféricas cuyo tamaño es menor que la longitud de onda de la luz incidente. Esta teoría se basa en la solución de las ecuaciones de Maxwell, que describen cómo se comporta la luz en presencia de materia. Cuando la luz incide en estas nanopartículas metálicas esféricas, se generan plasmones de superficie localizados. Estos plasmones provocan la creación de un dipolo eléctrico en la partícula, lo que produce un desplazamiento de electrones y una redistribución de carga. La magnitud de este efecto varía dependiendo del tamaño de la partícula y la longitud de onda de la luz incidente [36].

En la **Tabla I**, se presentan los diámetros de AgNPs a partir de su pico de resonancia de plasmón reportados en la literatura, teniendo en cuenta modelos matemáticos que parten de esta teoría.

**TABLA I.**  
DIÁMETROS DE NANOPARTICULAS DE PLATA REPORTADOS A PARTIR DE SU RESONANCIA DE PLASMÓN

<b>SPR Wavelength <math>\lambda</math></b>	<b>Reported Diameter D (nm)</b>
404,5	28
406,8	32
409,4	36
412,3	40
415,5	44
419,1	48
422,9	52
431,5	60
443,8	70
458,3	80
474,6	90
492,8	100

**Nota:** Fuente [37].

### 5.2.1.3. Cálculo de la concentración de AgNPs

La concentración de AgNPs sintetizadas por vía biológica, se calculan mediante el método descrito por Xingcan et al [38].

$$\text{Concentración}_{AgNPs} = \frac{N_{Total}}{NVN_A} \quad (1)$$

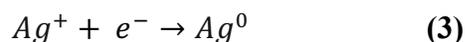
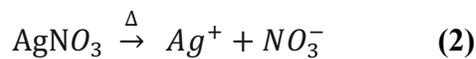
Donde  $V$  es el volumen de la solución coloidal de AgNPs.

$N_A$  es el número de Avogadro ( $6.02 \times 10^{23}$ ).

$N$  es el número de átomos de plata en cada AgNP y para calcular este, se debe suponer que todas las AgNPs tienen forma esférica, el número de átomos de plata se calcula considerando que la relación en volumen entre el átomo de plata y las AgNPs es del 74,1 % en la estructura cúbica. El radio del átomo de plata es de 0,144 nm y, por tanto, su volumen es de  $0,0125 \text{ nm}^3$ . Para AgNPs

con un diámetro de  $d$  nm, su volumen es  $\frac{\pi}{6} d^3 \text{ nm}^3$ . Por tanto, el número de átomos de plata ( $N$ ) en cada AgNP es igual a  $\frac{71,4}{100} \cdot \frac{\pi}{6} d^3 \cdot \frac{1}{0,0125}$  lo cual es  $31d^3$ .

$N_{Total}$  se refiere al número total de átomos de plata en la solución precursora ( $\text{AgNO}_3$ ), el cual es equivalente a la cantidad de sal añadida a la solución de reacción [39]. Sin embargo, esta cantidad debe expresarse en átomos, para calcularlo, se asume que todos los átomos de Ag se convirtieron en AgNPs y, además, se debe tener en cuenta las ecuaciones estequiométricas (2) y (3), para calcular  $N_{Total}$  descrita en la ecuación (4).



$$N_{Total} = X \text{ g AgNO}_3 \cdot \frac{1 \text{ mol AgNO}_3}{169,87 \text{ g AgNO}_3} \cdot \frac{1 \text{ mol Ag}^+}{1 \text{ mol AgNO}_3} \cdot \frac{1 \text{ mol Ag}^0}{1 \text{ mol Ag}^+} \cdot 6,02 \times 10^{23} \text{ átomos Ag}^0 \quad (4)$$

#### 5.2.1.4. Algunas técnicas de caracterización de AgNPs

##### 5.2.1.4.1. Dynamic Light Scattering

La técnica de DLS (Dispersión de Luz Dinámica) se emplea para medir el tamaño de partículas en solución, fundamentándose en la dispersión de la luz por partículas en movimiento, lo que posibilita la determinación del tamaño de nanopartículas. Al analizar la intensidad de la luz dispersada con relación al tiempo, la DLS ofrece datos sobre la distribución del tamaño de las partículas, permitiendo la evaluación de la uniformidad y estabilidad de las AgNPs [40].

##### 5.2.1.4.2. Espectrofotometría UV-visible

La espectrofotometría UV-visible es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto en solución. Se basa en que las moléculas absorben las radiaciones electromagnéticas y a su vez que la cantidad de luz absorbida depende de forma lineal de la concentración [41].

### 5.2.1.4.3. Infrarrojo con transformada de Fourier

La Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) es un método analítico ampliamente reconocido por su capacidad de identificar sustancias químicas con precisión. Este método se basa en la interacción de la luz infrarroja con la muestra en estudio. Durante el análisis, se evalúa la cantidad de radiación absorbida por la muestra en diversas longitudes de onda. Este proceso permite generar un espectro que representa la "huella espectral" única de la muestra, lo que facilita su identificación precisa [42].

## 5.2.2. Algunos hongos patógenos que afectan las plantaciones de banano.

### 5.2.2.1. *Mycosphaerella fijiensis*

*Mycosphaerella fijiensis*, conocido también por su anamorfo *Pseudocercospora fijiensis*, es un hongo ascomiceto haploide y heterotálico que pertenece a la clase Dothideomycetes, orden Capnoidiales y familia *Mycosphaerellaceae*, en la **Tabla II** se denota su taxonomía.

**TABLA II.**  
TAXONOMÍA *Mycosphaerella fijiensis*

<b>Taxonomía</b>	
<b>Reino</b>	Fungi
<b>Phyllum</b>	Ascomycota
<b>Clase</b>	Dothideomycetes
<b>Orden</b>	Capnoidiales
<b>Suborden</b>	Seudophaerineae
<b>Familia</b>	Mycosphaerellaceae
<b>Género</b>	<i>Mycosphaerella</i>
<b>Especie</b>	<i>fijiensis</i>

**Nota:** Fuente [43].

Este patógeno, que produce conidias multicelulares a partir de conidióforos, es el causante de la Sigatoka negra en las hojas de plátano (*Musa spp.*). Considerado como el más destructivo del “complejo de la enfermedad de la Sigatoka”, que también incluye a *M. musicola* y *M. eumusae*. *M. fijiensis* afecta principalmente a *Musa spp.* y provoca una amplia variedad de síntomas, cuya gravedad depende de los niveles de resistencia de las plantas hospederas individuales [44].

### 5.2.2.2. *Lasiodiplodia theobromae*

*Lasiodiplodia theobromae* es un hongo patógeno necrótrofo que pertenece al Filo Ascomycota, Clase *Dothideomycetes*, Orden *Botryosphaeriales* y Familia *Botryosphaeriaceae* (Ver **TABLA III.**)

**TABLA III.**  
TAXONOMÍA *Lasiodiplodia theobromae*

Taxonomía	
<b>Reino</b>	Fungi
<b>Phyllum</b>	Ascomycota
<b>Clase</b>	Dothideomycetes
<b>Orden</b>	Botryosphaeriales
<b>Familia</b>	Botryosphaeriaceae
<b>Género</b>	<i>Lasiodiplodia</i>
<b>Especie</b>	<i>Theobromae</i>

**Nota:** Fuente [45].

Inicialmente, este patógeno muestra un desarrollo micelial de color blanco que luego cambia a tonos cenizo oscuro y finalmente a negro. *Lasiodiplodia theobromae* puede provocar la pudrición de la corona en el cultivo del banano, lo que provoca problemas de calidad después de la cosecha y pérdidas económicas [46].

### 5.2.2.3. *Colletotrichum gloeosporioides*

*Colletotrichum gloeosporioides* es un hongo fitopatógeno perteneciente al phyllum Ascomycota, de clase Sordariomycetes (Ver **TABLA IV.**), conocido por desencadenar la antracnosis en una amplia gama de plantas, entre las que se incluyen el plátano y el aguacate. Este patógeno prospera en condiciones de alta humedad y durante la temporada de lluvias, causando daños considerables en hojas y frutos. Su capacidad para infectar tanto en etapas tempranas como en poscosecha lo convierte en una amenaza significativa para la agricultura, resultando en pérdidas económicas notables. A nivel morfológico, presenta una compleja estructura tanto macroscópica como microscópica, con ascomas solitarios o gregarios que exhiben una amplia variedad de características, desde células aplanadas de color marrón pálido hasta conidiomas acervulares de formas diversas [47].

**TABLA IV.**  
TAXONOMÍA *Colletotrichum gloeosporioides*

<b>Taxonomía</b>	
<b>Reino</b>	Fungi
<b>Phyllum</b>	Ascomycota
<b>Clase</b>	Sordariomycetes
<b>Orden</b>	Glomerellales
<b>Familia</b>	Glomerellaceae
<b>Género</b>	<i>Colletotrichum</i>
<b>Especie</b>	<i>Gloeosporioides</i>

Nota: Fuente [48].

### 5.2.3. Generalidades de *Musa acuminata*

El banano pertenece a la familia de las Musáceas y se caracteriza por ser una planta herbácea que produce flores [49]. Es notable por su tamaño, ya que algunas variedades pueden llegar a alcanzar hasta los 3 metros de altura, lo que la sitúa entre las plantas herbáceas más grandes. En lugar de tallos leñosos, sus estructuras están compuestas por capas de hojas. Se estima que existen alrededor de 70 especies diferentes dentro del género *Musa* [50]. Sus hojas son oblongas o elípticas, suaves al tacto y pueden extenderse hasta 3 metros de largo y 60 cm de ancho, con pecíolos delgados a menudo con bordes rojizos en el envés [51].

El banano, nativo del este asiático y Australia, se ha distribuido ampliamente por las regiones tropicales y se cultiva en unos 135 países alrededor del mundo. Entre estos países se destacan Mozambique, Uganda, Kenia, India, Filipinas, Ecuador, Colombia, Brasil y países centroamericanos. Se han identificado alrededor de 500 variedades de banano en todo el mundo, con algunas destacadas como los bananos Cavendish, que incluyen el Grand Nain, Petite Nain, Lacatan y William. Estas variedades pertenecen al grupo cultivar AAA y son plantas triploides con 33 cromosomas, produciendo frutos partenocárpicos, es decir, sin semillas. Entre todas, el cultivar Grand Nain es el más ampliamente comercializado a nivel mundial [52], [53].

---

#### **5.2.4. Cultivo *in vitro***

El cultivo *in vitro* de especies vegetales implica técnicas para el crecimiento controlado en laboratorio, regenerando organismos completos desde explantes como semillas o segmentos de hojas. Aunque ofrece control ambiental preciso, enfrenta desafíos como altos costos de equipamiento y necesidad de habilidades especializadas en técnicas asépticas [54], [55].

Estas técnicas se sustentan en dos conceptos fundamentales: la plasticidad, que describe la capacidad de las células vegetales para ajustarse a su entorno, y la totipotencia, que se refiere a la habilidad de una célula para regenerar un organismo completo. Específicamente para especies como el banano, se emplea una técnica particular denominada cultivo de meristemas, que implica el aislamiento y cultivo de secciones de la planta ricas en células indiferenciadas, predominantemente en los ápices y regiones axilares, todo ello bajo condiciones de esterilidad [9].

## VI. METODOLOGÍA

### 6.1. Preparación de extracto de cáscara de *Musa sp.*

Para la obtención de extractos de cáscara de *Musa sp.*, se tuvo en cuenta la metodología de Das y Velusamy [56]. Se realizó un lavado y pesado de 25 gramos de la cáscara de *Musa sp.* Seguidamente, se sometió a un tratamiento térmico a 80 °C durante 10 minutos en 400 mL de agua estéril destilada. El extracto resultante se filtró con papel Whatman No. 1 para su purificación, y posteriormente se empleó como matriz para la subsiguiente síntesis de nanopartículas de plata.

### 6.2. Biosíntesis de nanopartículas de plata

Se preparó soluciones precursoras de AgNO<sub>3</sub> a diferentes concentraciones (0.5, 1 y 1.5 mM) utilizando agua destilada estéril. Posteriormente, en un matraz de 100 mL, se procedió a mezclar 20 mL de la solución de AgNO<sub>3</sub> con 1 mL del extracto de cáscara de *Musa sp* [57]. La biosíntesis de las nanopartículas de plata se llevó a cabo a tres temperaturas distintas (70, 80 y 90 °C) para cada solución de AgNO<sub>3</sub>, con tres repeticiones para cada tratamiento y bajo agitación constante a 500 rpm durante 24 horas.

#### 6.2.1. Caracterización de nanopartículas de plata

Se llevó a cabo un análisis espectrofotométrico UV-VIS en el rango de 340 a 600 nm para cada muestra, con el fin de caracterizar la respuesta óptica de las nanopartículas formadas. Luego, se procedió a medir el área bajo la curva de absorbancia para cada tratamiento, seleccionando aquel con la mayor área. A partir del pico de absorbancia identificado, se estimó el diámetro de las AgNPs utilizando la teoría de Mie. Posteriormente, para obtener una cuantificación más precisa del diámetro de las AgNPs, se empleó la técnica de Dispersión Dinámica de Luz (DLS) en el tratamiento seleccionado. Se compararon los resultados obtenidos mediante ambos métodos, para analizar la variabilidad entre ellos. De este modo, se pudo estimar el diámetro de las AgNPs en los demás tratamientos basándose en los valores reportados en la literatura que derivan de la teoría de

Mie. Luego de conocer el tamaño de las AgNPs, se procedió a cuantificar la concentración obtenida a partir de la ecuación (1).

Por otro lado, se evaluó la muestra seleccionada mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), con el fin de conocer las posibles interacciones con moléculas circundantes. Estas interacciones son clave para la estabilidad temporal de las AgNPs y su estado de reducción.

### **6.2.2. Diseño experimental: Síntesis de AgNPs**

Para la evaluación de la síntesis de AgNPs, se diseñó un experimento factorial multinivel 3<sup>2</sup>. En este diseño, la variable respuesta fue el área bajo la curva de los espectros obtenidos en cada tratamiento, el cual se hallará a través del programa Python v. 3.12.4 [58]. La significancia de los resultados se determinó mediante un análisis de varianza (ANOVA) y la metodología de análisis de superficie de respuesta, con un nivel de significancia establecido en un valor de  $p \leq 0,05$ . Todo esto, se llevó a cabo utilizando el programa estadístico Statgraphics Centurion 19 v. 19.6.03 [59].

## **6.3. Evaluación de actividad antifúngica de AgNPs**

### **6.3.1. Evaluación de actividad antifúngica por halos de inhibición**

En el marco de la evaluación antifúngica de las nanopartículas de plata obtenidas mediante síntesis biológica, se llevó a cabo prueba de sensibilidad utilizando el método de halos de inhibición para las cepas *Colletotrichum sp.* y *Lasiodiplodia theobromae*, proporcionadas por el Laboratorio Fitoplant Departamento Técnico S.A.S. Este método consiste en medir el crecimiento del diámetro de la colonia posterior a 7 días de inoculación del hongo en PDA e incubando a 29 °C. La eficacia del producto se calculará como un porcentaje, comparando el crecimiento del diámetro de la colonia en el grupo de prueba con el del grupo de control, aplicando la ecuación (5).

$$\%Inhibición = \frac{(CDC_{Control} - CDC_{Tratamiento})}{CDC_{Control}} \cdot 100 \quad (5)$$

**$CDC_{Control}$** : Crecimiento del diámetro de la colonia en el control

**$CDC_{Tratamiento}$** : Crecimiento del diámetro de la colonia en el tratamiento

Se empleó diversos volúmenes de AgNPs (0, 1, 3, 5 y 7 mL) con 3 repeticiones para cada tratamiento, disueltas en medio de agar patata-dextrosa (PDA), con un volumen final para cada caja Petri de 20 mL.

### 6.3.2. Prueba de sensibilidad por tubos germinativos.

Para determinar la sensibilidad de *Pseudocercospora fijiensis* mediante tubos germinativos, se obtuvieron fragmentos de hojas completamente afectadas de *Musa sp.* en estadio 6, los cuales fueron fijados en discos de papel Kraft, organizados en una configuración de 9 cuadros por disco. Estos discos se humedecieron con agua destilada durante 30 minutos. Posteriormente, se eliminó el exceso de líquido y los discos fueron incubados a 26 °C durante 48 horas.

Tras el período de exposición en la cámara humedad, los discos con las muestras se insertaron en la porción interna de las tapas de las cajas Petri. Estas cajas se llenaron con agar complementado con volúmenes de nanopartículas de plata (0, 1, 3, 5 y 7 mL) en tres réplicas por concentración. Se realizó la descarga metódica de ascosporas invirtiendo las cajas Petri durante 30 minutos para asegurar una distribución uniforme. Luego, se retiraron los discos y las cajas Petri se incubaron a 26 °C durante 48 horas.

Posterior al periodo de incubación, se evaluaron los tubos germinativos según el método propuesto por el Comité de Acción de Resistencia a Fungicidas en 2009 [60]. La lectura se realizó desde el volumen más reducido (0 mL) hasta el más elevado (7 mL). Se evaluaron un mínimo de 30 esporas por tratamiento, exceptuando el control (0 mL de AgNPs), donde el

número de esporas evaluadas se incrementó a 60. El porcentaje de inhibición se calculó en relación con los tratamientos control utilizando la ecuación (6).

$$\%Inhibición = \frac{(L_{Control} - L_{Tratamiento})}{L_{Control}} \cdot 100 \quad (6)$$

$L_{Control}$ : Longitud del tubo germinativo del control

$L_{Tratamiento}$ : Longitud del tubo germinativo del tratamiento a evaluar.

#### 6.4. Evaluación de nanopartículas de plata en cultivo *in vitro* de *Musa sp.*

##### 6.4.1. Recolección, corte y desinfección del material vegetal

Se recolectaron 20 hijuelos pertenecientes a la especie *Musa sp.* en la finca ubicada en el municipio de Chigorodó, situada en las coordenadas 7° 38' 0.75" N y 76° 42' 35.9" W. Estos fueron trasladados al Laboratorio Fitoplant S.A.S. para su procesamiento posterior.

Los hijuelos fueron cortados a una altura cercana de 10 cm por encima de la inserción de la hoja en el cormo basal. Acto seguido, se procedió a la eliminación de las raíces del cormo hasta que se visualizara los tejidos blancos internos (**Ver Anexo b**), los cuales fueron sometidos a un enjuague con detergente y sumergidos en Boscalid (fungicida) al 1 % durante 30 min. Posteriormente, se realizó la remoción de los tejidos blancos hasta obtener pequeños cormos de una longitud aproximada de 2 a 3 cm de alto, el cual contiene el meristemo apical y una base de 1cm<sup>3</sup>. Después, se sumergieron en hipoclorito de sodio al 2 % durante 30 min, seguidos de 3 lavados consecutivos con agua destilada estéril. Luego, se llevó a cabo una inmersión de los cormos en etanol al 70 % durante un minuto y, por último, se dejaron sumergidos en una solución de ácido ascórbico a 500 mg/L y se trasladaron a la cámara de flujo laminar [61].

Dentro de la cámara de flujo laminar, se eliminó los primordios foliares hasta alcanzar cormos de una longitud de aproximadamente 0,5 cm. Posteriormente, los cormos fueron sumergidos en una solución de NaClO al 1% durante 10 minutos. Luego, se enjuagó 3 veces con agua destilada

estéril. Finalmente, los explantes fueron sumergidos en una solución de cloranfenicol con una concentración de 50 mg/L durante 10 minutos.

#### **6.4.2. Preparación de medios de cultivo *in vitro* enriquecidos con AgNPs**

Los explantes fueron colocados en un medio de cultivo, basado en la formulación MS de Murashige y Skoog [62]. Este medio fue enriquecido con 30 g/L de sacarosa, 1 g/L de carbón activado, 7 mg/L de BAP (6-bencilaminopurina), 0.2 mg/L de AIA (ácido-3- indolacético) y 7 g/L de agar. Se esterilizó en autoclave a 121 °C durante 15 min. Luego de este proceso, se agregó a través de acrodisco 0.5 mg/L de adenina, 15 mg/L de ácido glutámico y se varió volúmenes de AgNPs (**T<sub>0</sub>**: 0, **T<sub>1</sub>**: 1, **T<sub>2</sub>**: 3, **T<sub>3</sub>**: 5 y **T<sub>4</sub>**:7 mL). El pH del medio se ajustó a  $5,8 \pm 0,1$  utilizando NaOH 1 M.

Los cultivos se mantuvieron a una temperatura constante de  $25 \pm 2$  °C y una humedad relativa de aproximadamente 70-80 %. Durante los primeros 8 días, se conservaron en oscuridad, seguidos por un período en el que se expusieron a una intensidad de luz de aproximadamente 2000 lux, con un fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad durante 30 días. Los cultivos se renovaron al día 15 en medios frescos con la misma composición [63].

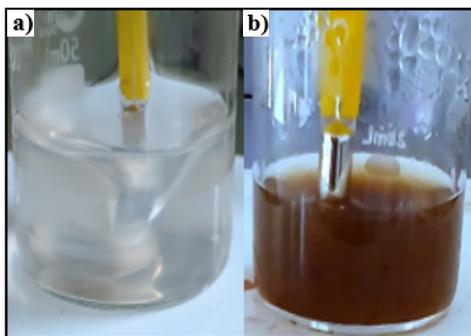
#### **6.4.3. Diseño experimental: Influencia de AgNPs en el desarrollo *in vitro* de *Musa sp.***

Los cultivos fueron distribuidos siguiendo un diseño experimental de bloques al azar, con tres repeticiones por cada tratamiento. El factor principal fue la variación de volumen de nanopartículas de plata, que abarcaron los niveles de 0, 1, 3, 5 y 7 mL. Las variables respuesta fue el recuento del número de brotes formados por explante y la medición de la longitud de los brotes. Se estableció un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$ . Todo el análisis se realizó utilizando el programa estadístico Statgraphics Centurion 19 v. 19.6.03 [59].

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 7.1. Formación de nanopartículas de plata a partir de extracto de cáscara de *Musa sp.*

En una fase inicial, se midió pH en el extracto de cáscara de *Musa sp.* y de la solución precursora, el cual arrojó el valor de 6.8 y 7.2 respectivamente. Luego, se llevó a cabo la síntesis de nanopartículas de plata mediante la biorreducción de iones de plata en los distintos tratamientos. Se confirmó que, al añadir  $\text{AgNO}_3$  al extracto de cáscara de *Musa sp.*, se produjo un notable cambio de color translúcido a marrón oscuro posterior a las 24 horas, como se observa en la **figura 2**. Tras este proceso, se volvió a medir pH, obteniendo un valor de 7.1. Este cambio cromático de la solución es indicativo de la formación de AgNPs, atribuible a la excitación de las vibraciones del plasmón superficial de las nanopartículas [56].



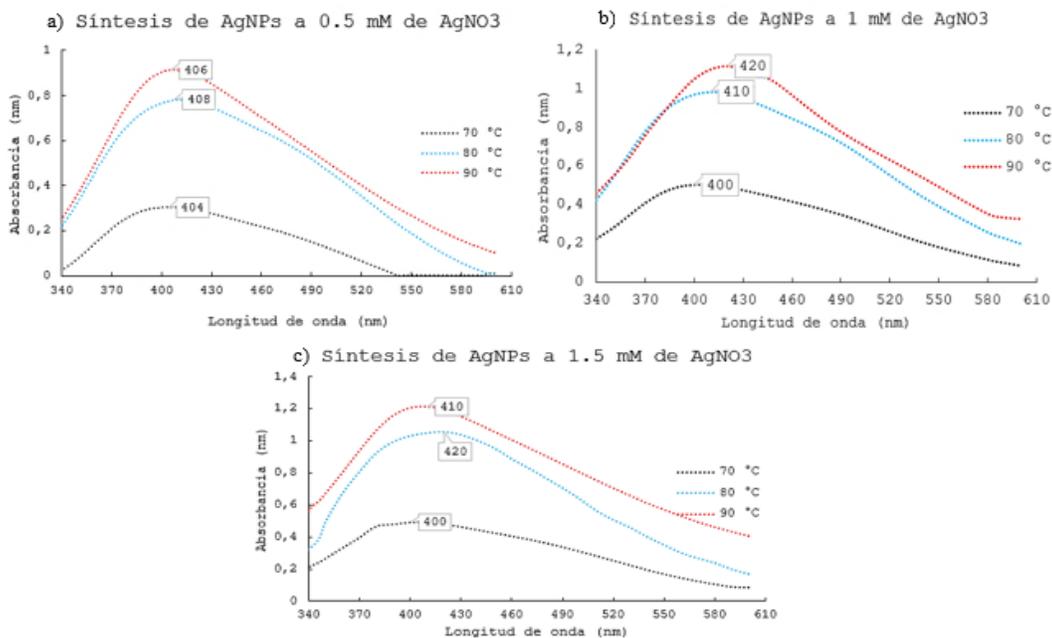
**Fig. 2** Formación de AgNPs. **a)** Inicio. **b)** Posterior a 24 horas.

**Nota:** Fuente propia.

#### 7.1.2. Caracterización espectrofotométrica UV-VIS de nanopartículas de plata

En la **figura 3**, se observa los diferentes tratamientos analizados por espectrofotometría UV-VIS, donde se denotan picos de absorción de resonancia de plasmón superficial (SPR) prominentes en un intervalo de 400 y 420 nm. Estos resultados sugieren que las condiciones evaluadas en la biosíntesis de AgNPs, influyen en las características ópticas de las nanopartículas de plata. Además, la presencia de diferentes picos de absorción en el rango visible (Ver **figura 3**) puede indicar la presencia de diferentes tamaños, así como variaciones en la dispersión de estas [64].

Los resultados obtenidos coinciden parcialmente con lo reportado por Kokila et al. [57] quienes utilizaron un extracto vegetal similar para la síntesis de AgNPs por métodos verdes y se observa una correspondencia parcial en los resultados. En su investigación, reportaron picos de SPR que oscilan entre 410 y 450 nm. Esta variabilidad dentro del rango de 410-450 nm lo atribuyeron a las diferencias en los detalles experimentales, como los diferentes volúmenes empleados de extracto de cáscara de banana Cavendish (1, 2, 3, 4 y 5 mL) y variabilidad de pH (2, 4, 6 y 8), donde afirman que hay una mayor síntesis de AgNPs a pH 8 y un volumen de extracto de 4 mL en 100 mL de  $\text{AgNO}_3$  1 mM a temperatura ambiente.



**Fig. 3** Espectros UV-VIS de AgNPs sintetizadas variando concentración de sal precursora y temperatura. **a)** 0.5 mM de  $\text{AgNO}_3$ , **b)** 1.0 mM de  $\text{AgNO}_3$  y **c)** 1.5 mM de  $\text{AgNO}_3$ .

**Nota:** Fuente propia usando Excel.

Por otro lado, los resultados evidencian una correlación directa entre el aumento de la temperatura y la concentración de  $\text{AgNO}_3$  con el incremento del área bajo la curva de los espectros, la cual constituye la variable de respuesta en este estudio. A través del desarrollo de un diseño factorial  $3^2$ , se identificaron los efectos de los factores de estudio, temperatura y concentración de  $\text{AgNO}_3$ , sobre la variable de respuesta. Esta variable cuantitativa permite relacionar de manera adecuada la síntesis de AgNPs con la resonancia de plasmones superficiales. Una mayor área bajo la curva de los espectros indica una mayor formación de AgNPs en la solución [65].

### 7.1.3. Análisis estadístico: Síntesis verde de AgNPs

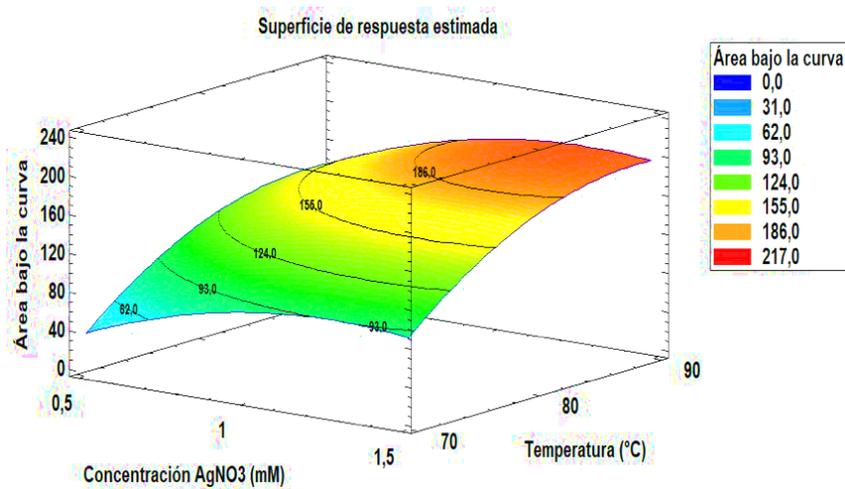
En la **Tabla V** se presenta el análisis de varianza (ANOVA), la cual proporciona y analiza los efectos de varios factores sobre el área bajo la curva. Los factores evaluados incluyen la concentración de  $\text{AgNO}_3$  (A), la temperatura (B), y las interacciones (AA, AB, BB), además de un bloque adicional. Los valores P extremadamente bajos para A (0.0000) y B (0.0000) indican que ambos factores son altamente significativos, con una Razón-F muy alto, especialmente para la temperatura, lo que sugiere una influencia considerable sobre el área bajo la curva. Los factores AA y BB también muestran significancia con valores P bajos, mientras que AB tiene una influencia menor pero significativa. En contraste, los bloques no son significativos (Valor-P de 0.4727), indicando que no hay una variabilidad relevante atribuida a los bloques en este experimento. Esto demuestra que la cantidad de nanopartículas de plata sintetizadas está fuertemente influenciada por la variación de ambos parámetros estudiados y sus interacciones.

**TABLA V.**  
ANOVA PARA LA VARIABLE RESPUESTA ÁREA BAJO LA CURVA

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A: Concentración $\text{AgNO}_3$	8830,27	1	8830,27	3445,85	0,0000
B: Temperatura	33550,2	1	33550,2	13092,4	0,0000
AA	2278,79	1	2278,79	889,26	0,0000
AB	30,459	1	30,459	11,89	0,0055
BB	3756,67	1	3756,67	1465,97	0,0000
blocks	1,41681	1	1,41681	0,55	0,4727
Error total	28,1884	11	2,56258		
Total (corr.)	48476	17			

**Nota:** Fuente propia usando Statgraphics Centurion.

Para la determinación del área bajo la curva de cada tratamiento, se implementó un código en Python [58], cuyos resultados se ilustran en la **figura 4**, la cual representa gráficamente una superficie de respuesta estimada.



**Fig. 4** Superficie de respuesta estimada en la biosíntesis de AgNPs.

**Nota:** Fuente propia usando Statgraphics Centurion.

Este análisis ha estimado la mejor condición de operación para la síntesis de AgNPs dentro de los rangos estudiados. Confirma que, tanto la concentración de AgNO<sub>3</sub> como la temperatura influyen significativamente en el área bajo la curva, sugiriendo que su optimización es crucial para procesos que dependen de estas variables. La superficie de respuesta ilustra que los valores más elevados del área bajo la curva, indicativos de una mayor síntesis de AgNPs, se alcanzan a mayor concentración de AgNO<sub>3</sub>, lo cual ratifica en sus estudios Bag y Huo [66], [67] y temperatura elevada, que a su vez valida Stavinskava y Jiang [68], [69]. Adicionalmente, la **figura 4** ilustra la complejidad de la interacción entre la concentración de AgNO<sub>3</sub> y la temperatura. Se refleja en la curvatura del gráfico, que no sigue una relación lineal simple. Esta complejidad subraya la importancia de una metodología rigurosa de diseño experimental para identificar las condiciones exactas que maximicen la síntesis de AgNPs.

#### 7.1.4. Análisis espectrofotométrico UV-VIS

Es trascendental destacar de la **figura 3** que, en estos ensayos se reportó la presencia de una sola banda SPR en todos los espectros UV-VIS en cada tratamiento. Dichos resultados, corresponden a la producción de nanopartículas isotrópicas, con morfología uniforme y con poca polidispersidad [70]. Lo anterior, se puede comprender mejor analizando la extinción de los diferentes espectros a partir de la teoría de Mie [71], en este caso para AgNPs que tienen un único centro de banda plasmónica, en el que en este estudio osciló entre 400 y 420 nm.

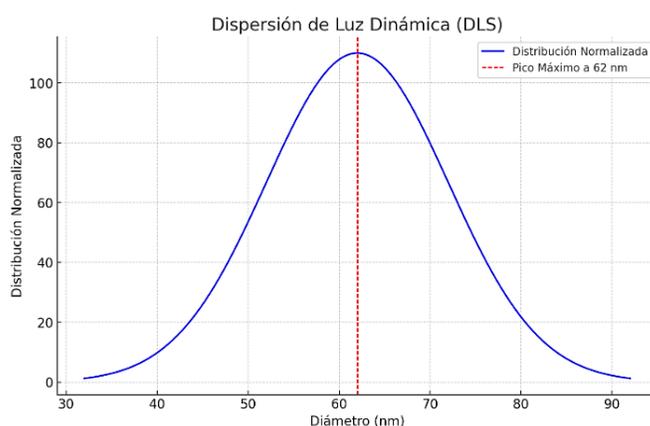
La Resonancia de Plasmones Superficiales (SPR) es la propiedad óptica clave de las nanoestructuras metálicas, causada por la oscilación colectiva de electrones al ser perturbados por una onda electromagnética [72]. Esta se clasifica en plasmones superficiales propagados y localizados. Las nanoestructuras con plasmones superficiales localizados pueden experimentar un campo electromagnético uniforme cuando son excitadas por la luz, debido a su tamaño menor que la longitud de onda [73]. Partiendo de esta definición, se puede observar en la **figura 3 (a, b y c)** que, al aumentar tanto la temperatura como la concentración de  $\text{AgNO}_3$ , no se producen desplazamientos ni a la izquierda ni a la derecha en la longitud de onda máxima del pico SPR para AgNPs [74] y, además, no se observaron plasmones adicionales. Esto da pie a inferir que, durante esta síntesis biológica de AgNPs, se logró controlar tanto la morfología esférica como el tamaño de las AgNPs [75] y a su vez, partiendo de los diámetros de AgNPs reportados por literatura, los cuales tienen en cuenta la teoría de Mie, se puede estimar que, a una longitud de onda de 400 nm, el diámetro de las nanopartículas es de 26 nm, mientras que, a una longitud de onda de 420 nm, el diámetro es de 60 nm [37].

Según lo arrojado en la **figura 4**, la biosíntesis de AgNPs es mayor en el tratamiento T<sub>9</sub> (1.5 mM; 90 °C). Sin embargo, es importante destacar que el pico máximo de SPR de este tratamiento se encuentra a 410 nm, lo que sugiere que las AgNPs tienen un diámetro de aproximadamente 30 nm, según Car y Krstulović [37]. Para esta investigación, es crucial obtener AgNPs con un diámetro de entre 50 y 70 nm, ya que el objetivo es evaluar su capacidad antifúngica contra patógenos asociados a la pudrición de plantas musáceas, lo cual ratifica los estudios realizados por Kaur [21], quien identificó que este rango de tamaño es eficaz para inhibir un alto porcentaje de estos hongos.

A partir de este postulado, se denota que el tratamiento T<sub>6</sub> (1.0 mM; 90 °C), demuestra la segunda mayor eficacia en la biosíntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) y presenta un diámetro estimado dentro del rango deseado. Este tratamiento se caracteriza por un pico máximo de resonancia plasmónica superficial de 420 nm y un diámetro estimado de 60 nm [37], lo cual lo hizo idóneo para ser caracterizado mediante dispersión de luz dinámica (DLS), con el fin de validar lo antes mencionado. También se midió por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y posterior a dichas validaciones, se seleccionó para evaluar actividad antifúngica en algunas cepas que afectan al cultivo musáceo.

### 7.1.5. Caracterización por dispersión de luz dinámica (DLS)

En la **figura 5**, se puede denotar la caracterización de las AgNPs del tratamiento T<sub>6</sub> por DLS, la cual sugiere que dicho tratamiento produce nanopartículas de plata con un tamaño promedio de 62 nm y una distribución estrecha de tamaños, lo cual es indicativo de un proceso de síntesis verde exitoso [76]. En adición, esta caracterización valida el 96,8% de la estimación previamente predicha del tamaño de nanopartículas de plata para esta investigación, conforme a los estudios llevados a cabo por Car y Krstulović [37]. Considerando estos resultados, podemos inferir, a partir de la ecuación (1) y sus suposiciones, que la concentración de AgNPs obtenida es de 39.99 nM.



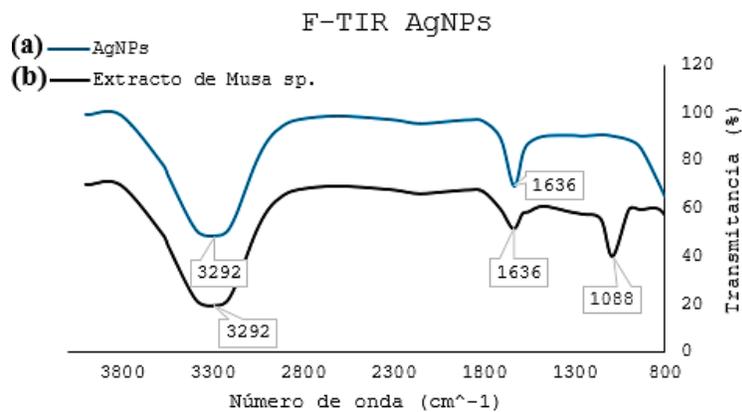
**Fig. 5** DLS del tratamiento T<sub>6</sub> (1.0 mM; 90 °C).

**Nota:** Fuente propia usando Python.

### 7.1.6. Caracterización de infrarrojos por transformada de Fourier (FT-IR)

Los espectros infrarrojos por transformada de Fourier (FT-IR) se registraron en un espectrofotómetro de Perkin Elmer para determinar el grupo funcional presente en las AgNPs y el extracto de cáscara de *Musa sp.* Se analizaron las intensidades de banda en diferentes regiones del espectro, los cuales se muestran en la **figura 6**. Los datos del FT-IR del extracto de cáscara de *Musa sp.* mostraron que contenía grupos funcionales -OH, -OH-fenólico, -COOH y amida (Bandas 3292, 1636 y 1088  $\text{cm}^{-1}$  respectivamente), lo cual se puede validar de acuerdo con el estudio hecho por Bag et al [66].

Se puede observar que, el pico de absorción fuerte y amplio fue de 3292  $\text{cm}^{-1}$  el cual corresponde a las vibraciones de estiramiento NH de las aminas. Este pico también corresponde a las vibraciones de estiramiento O-H (unidas por H) de fenoles y ácidos carboxílicos, lo que indicó la participación de estos grupos funcionales en la síntesis de nanopartículas de plata [56]. El pico ubicado en 1636  $\text{cm}^{-1}$  se atribuyó al estiramiento de C=O en el carboxilo o a la vibración de flexión de C=N en el grupo amida [57]. Las alteraciones observadas en el pico subrayan la implicación de los grupos funcionales presentes en el extracto de cáscara de *Musa sp.* en la reducción de iones plata ( $\text{Ag}^+$ ) a plata metálica ( $\text{Ag}^0$ ) y en su subsiguiente estabilización. De este modo, los grupos amida, COOH y fenoles funcionan como ligandos esenciales en el proceso de síntesis y estabilización de las nanopartículas.

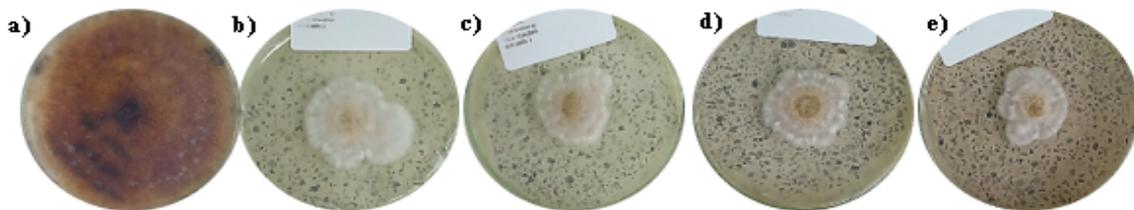


**Fig. 6** Espectro FTIR (a) AgNPs y (b) Extracto de cáscara de *Musa sp.*

**Nota:** Fuente propia usando Excel.

## 7.2. Evaluación de actividad antifúngica de AgNPs frente a hongos asociados al cultivo musáceos.

En este estudio se evaluó la actividad antifúngica de nanopartículas de plata (AgNPs) contra diversas cepas de hongos que afectan el cultivo de musáceas. Inicialmente, Se evaluó la eficacia mediante la formación de halos de inhibición, observados siete días después de la inoculación e incubados a 29 °C frente a *Colletotrichum gloeosporioides*, patógeno causante de enfermedades como la antracnosis en el banano [77]. La **figura 7** ilustra los distintos halos de inhibición, permitiendo una comparación entre la muestra control y los diversos volúmenes de AgNPs añadidos al medio.



**Fig. 7** Ensayo antifúngico de AgNPs frente a *colletotrichum gloeosporioides*. **a)** Control. **b)** AgNPs 1 mL. **c)** AgNPs 3 mL. **d)** AgNPs 5 mL. **e)** AgNPs 7 mL.

**Nota:** Fuente propia.

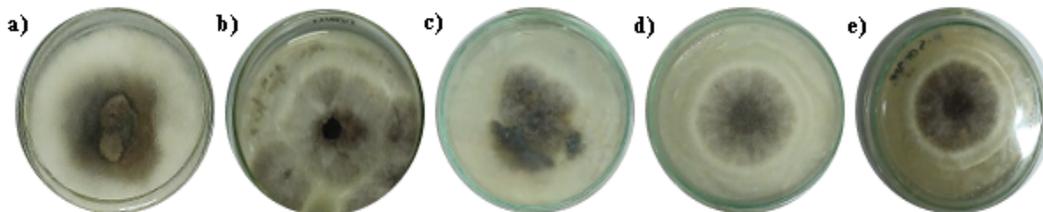
En la **tabla VI** se presentan los porcentajes de inhibición obtenidos en este estudio, evidenciando la eficacia de las nanopartículas de plata en la supresión del crecimiento de *Colletotrichum gloeosporioides* de hasta un 84% a una concentración de AgNPs de aproximadamente 5,60 nM. La clara correlación entre el aumento de la concentración de nanopartículas y la disminución del diámetro promedio del hongo subraya el potencial de esta tecnología en el control de patógenos agrícolas [78].

**TABLA VI.**  
EFICACIA INHIBITORIA DE AgNPs FRENTE A *Colletotrichum gloeosporioides*

Tto	Diámetro promedio (cm)	% Inhibición
Control	9,00 ± 0,1	N/A
1 mL	4,25 ± 0,1	52,8 %
3 mL	2,93 ± 0,1	67,4 %
5 mL	1,86 ± 0,1	79,3 %
7 mL	1,44 ± 0,1	84,0 %

Nota: Fuente propia usando Excel.

Por otro lado, se evaluó la eficacia de estas AgNPs contra *Lasiodiplodia theobromae* bajo las mismas condiciones experimentales. En la figura 8, se observa los halos de inhibición formados durante el estudio, comparando la muestra control con las diferentes concentraciones de AgNPs.



**Fig. 8** Ensayo antifúngico de AgNPs frente a *Lasiodiplodia Theobromae*. **a)** Control. **b)** AgNPs 1 mL. **c)** AgNPs 3 mL. **d)** AgNPs 5 mL. **e)** AgNPs 7 mL.

Nota: Fuente propia.

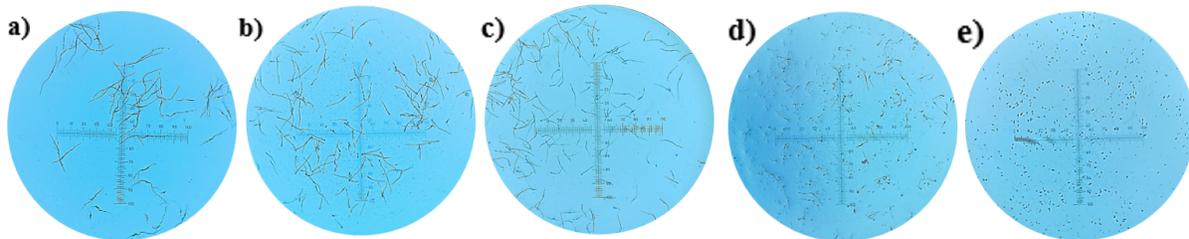
En la **tabla VII**, se puede evidenciar la eficacia inhibitoria en cada tratamiento, obteniendo inhibiciones máximas de un 54,9 % a una concentración de AgNPs de aproximadamente 5,60 nM. Estos datos reflejan el potencial significativo de las AgNPs para reducir el crecimiento de *Lasiodiplodia theobromae*, causante de la pudrición de corona en la familia de las musáceas [79].

**TABLA VII.**  
EFICACIA INHIBITORIA DE AgNPs FRENTE A *Lasiodiplodia theobromae*

Tto	Diámetro promedio (cm)	% Inhibición
Control	9,00 ± 0,1	N/A
1 mL	7,33 ± 0,1	18,6%
3 mL	7,00 ± 0,1	22,2%
5 mL	4,80 ± 0,1	46,7%
7 mL	4,06 ± 0,1	54,9%

Nota: Fuente propia usando Excel.

Se evaluó la eficacia de las AgNPs en la inhibición de tubos germinativos en *Pseudocercospora fijiensis*. La figura 9 muestra una reducción en la longitud de los tubos germinativos conforme se incrementa el volumen de AgNPs en los diferentes tratamientos.



**Fig. 9** Ensayo antifúngico de AgNPs por tubos germinativos en *Pseudocercospora fijiensis*. a) Control. b) AgNPs 1 mL. c) AgNPs 3 mL. d) AgNPs 5 mL. e) AgNPs 7 mL.

Nota: Fuente propia

En la **Tabla VIII** se destacan los porcentajes de inhibición logrados en cada tratamiento, mostrando una notable eficacia que alcanza hasta el 94,7 % a una concentración de aproximadamente 5,60 nM de AgNPs. Este resultado subraya el potencial de las AgNPs para suprimir la formación de tubos germinativos de *Pseudocercospora fijiensis*. Este efecto se atribuye a la capacidad de las AgNPs para inhibir la actividad de diversas enzimas hidrolíticas extracelulares y para generar cantidades significativas de especies reactivas de oxígeno, lo cual contribuye a la inhibición del crecimiento del tubo germinativo del hongo [80].

**TABLA VIII.**  
EFICACIA INHIBITORIA DE AgNPs FRENTE A *Pseudocercospora fijiensis*.

<b>Tto</b>	<b>Longitud tubo germinativo (mm)</b>	<b>% Inhibición</b>
Control	1,89 ± 0,01	N/A
1 mL	1,27 ± 0,01	32,7 %
3 mL	0,98 ± 0,01	47,9 %
5 mL	0,39 ± 0,01	79,4 %
7 mL	0,10 ± 0,01	94,7 %

**Nota:** Fuente propia usando Excel.

La inhibición de los diversos patógenos asociados al deterioro del cultivo musáceo por AgNPs, se debe a que, estas modifican el crecimiento de los hongos mediante la inducción de daños celulares, estrés osmótico, daño en la pared celular y estrés oxidativo, lo que culmina en la inhibición del crecimiento micelial y en cambios morfológicos significativos en los hongos. Las nanopartículas de plata (AgNPs) interactúan con la membrana celular de los hongos, interfiriendo en sus procesos celulares y liberando iones de plata que comprometen la integridad de la membrana celular microbiana, resultando en la inhibición del crecimiento fúngico. Adicionalmente, las nanopartículas pueden causar efectos adversos graves en la morfología de las hifas y los conidios, reforzando aún más sus propiedades antifúngicas [81].

La capacidad de las nanopartículas de plata (AgNPs) para desencadenar diversos mecanismos de estrés en los hongos destaca su eficacia como agentes antifúngicos de amplio espectro. La liberación de iones de plata no solo compromete la integridad de la membrana celular, sino que también puede alterar la actividad enzimática y la estructura del ADN, provocando una disfunción celular generalizada [82]. Este enfoque multifacético en la acción de las nanopartículas puede disminuir la probabilidad de que los hongos desarrollen resistencia, convirtiendo a las AgNPs en una herramienta valiosa para el manejo de enfermedades fúngicas tanto en la agricultura como en otras industrias, especialmente aquellas que afectan cultivos económicamente importantes. Estos hallazgos destacan la versatilidad y efectividad de las nanopartículas como agentes antifúngicos, lo que podría traducirse en una disminución del uso de fungicidas químicos tradicionales y, por ende, en un menor impacto ambiental y una mejora en la sostenibilidad de las prácticas agrícolas [83], [84].

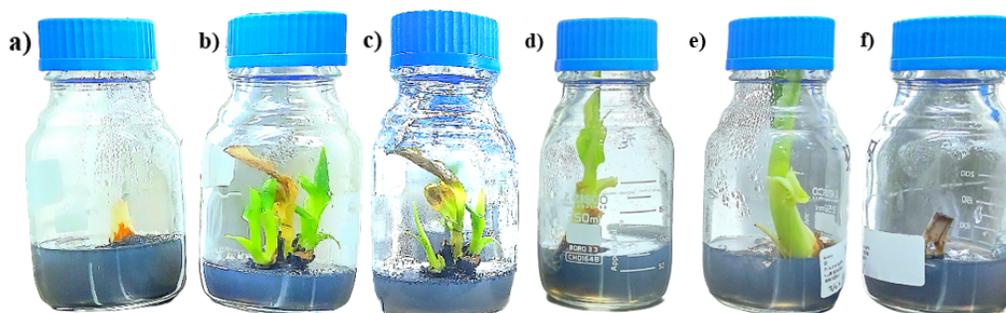
### 7.3. Evaluación de AgNPs en el desarrollo *in vitro* de *Musa sp.*

La influencia de las nanopartículas de plata (AgNPs) en el desarrollo *in vitro* de *Musa sp.* fue evaluada mediante la variación de diferentes volúmenes en el medio de cultivo, manteniendo un volumen final de 75 mL para cada tratamiento. En la **Tabla IX** se presenta el efecto de las AgNPs en el *cultivo in vitro* después de un período de 30 días, el cual se midió la altura de cada explante y el número de brotes obtenidos en cada tratamiento, mientras que la **figura 10** ofrece una representación visual de los resultados obtenidos.

**TABLA IX.**  
EFECTO DE LAS AgNPs EN EL DESARROLLO IN VITRO DE *Musa sp.*

Volumen AgNPs (mL)	Altura promedio (cm)	Número de brotes
0	5,25 ± 0,1	4
1	5,26 ± 0,1	0
3	5,95 ± 0,1	0
5	9,13 ± 0,1	0
7	0	0

**Nota:** Fuente propia usando Excel.



**Fig. 10** Cultivo *in vitro* de *Musa sp.* con adición de AgNPs. **a)** Control. **b)** 0 mL de AgNPs. **c)** 1 mL AgNPs. **d)** 3 mL de AgNPs. **e)** 5 mL de AgNPs. **f)** 7 mL de AgNPs.

**Nota:** Fuente propia.

### 7.3.1. Análisis estadístico: Influencia de AgNPs en el desarrollo *in vitro* de *Musa sp.*

La **Tabla X** muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para las variables respuesta de altura y número de brotes en el estudio. La suma de cuadrados entre grupos es significativamente alta (85,9738), en comparación con la suma de cuadrados dentro de los grupos (0,0014), indicando una notable variación atribuible a los tratamientos aplicados. El valor de la razón F (76762,4), es extremadamente elevado, lo que, junto con el valor p de 0,000, sugiere que las diferencias observadas entre los grupos son altamente significativas. Este resultado demuestra que los distintos volúmenes de nanopartículas de plata tienen un efecto considerable en la altura y el número de brotes de las plantas de *Musa sp.*

La diferencia marcada entre los cuadrados medio de entre grupos (21,4935) y el cuadrado medio dentro de los grupos (0,00028) refuerza la conclusión de que la variación en las variables respuesta es esencialmente debida a los volúmenes de AgNPs aplicadas, más que a la variabilidad aleatoria dentro de los grupos. Estos hallazgos subrayan la eficacia de las nanopartículas de plata como factor experimental, influyendo significativamente en el desarrollo *in vitro* de *Musa sp.* La elevada significancia estadística, reflejada en el valor p, corrobora la robustez de los resultados obtenidos y sugiere que la variación de volumen de AgNPs son un determinante crucial en el crecimiento y proliferación de brotes en el medio de cultivo estudiado.

**TABLA X.**  
ANOVA PARA LA VARIABLE RESPUESTA ALTURA Y NÚMERO DE BROTES.

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	85,9738	4	21,4935	76762,4	0,000
Intra grupos	0,0014	5	0,00028		
Total (Corr.)	85,9752	9			

**Nota:** Fuente propia usando Statgraphics Centurion.

La **Tabla XI** muestra los resultados de un análisis de grupos homogéneos, donde se comparan las medias de diferentes niveles de tratamiento para determinar si existen diferencias significativas entre ellos. En esta tabla, se observan cinco niveles de tratamiento, cada uno con cuatro casos evaluados. La inclusión de los niveles en grupos homogéneos, indicados con la letra "X", sugiere

que los niveles que comparten la misma columna no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sus medias.

El análisis revela que, los niveles 0 y 1, con medias de 5,25 y 5,26 respectivamente, pertenecen al mismo grupo homogéneo, lo que indica que no hay diferencias significativas en sus efectos. Sin embargo, el nivel 5, con una media de 9,13, se sitúa en un grupo separado, destacándose por su efecto significativamente mayor en comparación con los otros niveles. Estos resultados son cruciales, para evidenciar que ciertos niveles de nanopartículas de plata tienen un impacto considerablemente mayor en el desarrollo estudiado, mientras que otros niveles no producen diferencias apreciables.

**TABLA XI.**  
PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS (TUKEY) PARA LA VARIABLE ALTURA.

<b>Nivel</b>	<b>Casos</b>	<b>Media</b>	<b>Grupos homogéneos</b>
7	4	0	X
0	4	5,25	X
1	4	5,26	X
3	4	5,93	X
5	4	9,13	X

**Nota:** Fuente propia usando Statgraphics Centurion.

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se puede inferir con claridad que el mejor tratamiento fue la adición de 5 mL de AgNPs al medio de cultivo *in vitro*, el cual se traduce a una concentración de aproximadamente 2,67 nM. Este tratamiento demostró la mayor elongación de los explantes y está respaldado estadísticamente. Diversos estudios han indicado que las nanopartículas de plata a bajas concentraciones pueden acumular sustancias beneficiosas como prolina, clorofila y enzimas antioxidantes, mejorando significativamente la vitalidad de las muestras [85]. Mohamed et al. [86] informó que las nanopartículas pueden eliminar ciertos contaminantes bacterianos y fúngicos que suelen causar la muerte de los explantes, lo cual podría explicar por qué las muestras cultivadas en medios suplementados con AgNPs se presentaron más frescas, limpias y vigorosas. Adicionalmente, Fazal et al. [87] descubrió que las AgNPs tienen la capacidad de inhibir la producción de etileno, resultando en un aumento del contenido de clorofila en las hojas, una mayor elongación de los explantes y una mejora en el enraizamiento de los cultivos *in vitro* de banano [88]. Estos hallazgos sugieren que las AgNPs no solo mejoran el

crecimiento y desarrollo de los explantes mediante mecanismos de eliminación de patógenos y acumulación de compuestos útiles, sino que también potencian la fisiología de las plantas al inhibir procesos hormonales que limitan su desarrollo.

Por otro lado, se observa que la adición de 7 mL de AgNPs al medio de cultivo *in vitro* produjo resultados negativos, evidenciados por la fenolización completa del cormo, lo que llevó a la inviabilidad del explante. Este fenómeno puede explicarse debido a que concentraciones elevadas de AgNPs pueden inducir diversos efectos adversos, lo cual afirma Navarro et al. [89], donde sus investigaciones demostraron que en altas concentraciones de AgNPs, los iones  $Ag^+$  se liberan y causan toxicidad.

Los resultados obtenidos son prometedores; sin embargo, es crucial destacar que el objetivo principal del cultivo *in vitro* es la micropropagación, es decir, la propagación masiva de nuevas plantas a partir de pequeñas porciones de la planta original, como meristemos apicales [90]. Basándose en este objetivo, se observó en este estudio que el tratamiento que produjo el mayor número de brotes fue aquel en el que no se añadieron AgNPs, siendo, de hecho, el único que generó brotes. Esto sugiere que las nanopartículas de plata podrían ser mejor aprovechadas en la etapa de elongación del cultivo *in vitro*.

Este hallazgo respalda las afirmaciones de Sreelekshmi et al. [91], quienes demostraron en sus estudios que la aplicación de AgNPs como inductor en sistemas de cultivo de tejidos mejora la producción de metabolitos bioactivos en las plantas como flavonoides, compuestos fenólicos y saponinas, indicando su potencial para estimular el crecimiento de las plantas de *Musa sp.* mediante la activación de vías enzimáticas y la síntesis de fitoquímicos. Por lo tanto, las AgNPs muestran un gran potencial en ciertas etapas del cultivo *in vitro* y su aplicación debe ser cuidadosamente optimizada para evitar efectos negativos y maximizar su efectividad en la micropropagación y el desarrollo vegetal.

## VIII. CONCLUSIONES

En este estudio se ha logrado desarrollar un método verde para la síntesis de nanopartículas de plata utilizando extracto de cáscara de *Musa sp.*, destacando la influencia significativa de la temperatura y la concentración de  $\text{AgNO}_3$  en el proceso de biorreducción. Las caracterizaciones mediante espectrofotometría UV-VIS, dispersión de luz dinámica (DLS) y espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) han confirmado la obtención de nanopartículas de plata con tamaños comprendidos entre 50 y 70 nm. Esta confirmación valida la hipótesis inicial del estudio y respalda la reducción del ion  $\text{Ag}^+$  a  $\text{Ag}^0$ .

Se evaluó la eficacia de las AgNPs en la inhibición de varios hongos que afectan el cultivo de banano. Se observó una notable reducción del crecimiento de los hongos: *Colletotrichum gloeosporioides* disminuyó hasta un 84 %, *Lasiodiplodia theobromae* mostró una reducción máxima del 54,9 %, y *Pseudocercospora fijiensis* fue inhibida hasta un 94,7 % utilizando una concentración de AgNPs de aproximadamente 5,60 nM. Estos resultados subrayan el potencial de las AgNPs sintetizadas a partir de extracto de cáscara de *Musa sp.* como agentes antifúngicos efectivos. Este hallazgo no solo apoya la viabilidad del método propuesto en la producción de AgNPs, sino que también sugiere su aplicación promisoriosa en la protección de cultivos de banano contra enfermedades fúngicas, promoviendo así prácticas agrícolas más sostenibles y ecológicamente amigables.

Se logró evidenciar que la adición de 5 mL de AgNPs (Concentración de aproximadamente 2,67 nM) al medio de cultivo MS, influencia significativamente en la elongación y el desarrollo del meristemo apical de *Musa sp.* Este hallazgo da a concluir que, las AgNPs no solo actúan como agentes antimicrobianos efectivos, sino que también pueden desempeñar un papel crucial en la promoción del crecimiento y desarrollo de plantas. La utilización de AgNPs sintetizadas a partir de métodos verdes, como el empleo de extracto de cáscara de *Musa sp.*, podría representar una innovación en la biotecnología vegetal, proporcionando una alternativa eficiente y sostenible para mejorar el rendimiento y la salud de los cultivos de banano. Estos resultados subrayan la potencial aplicación de las AgNPs en la agricultura moderna, ofreciendo nuevas vías para la mejora de cultivos mediante la integración de nanobio tecnología y prácticas agrícolas verdes.

## IX. RECOMENDACIONES

En primer lugar, se recomienda estudiar una síntesis biológica de AgNPs a partir del mismo extracto de cáscara de *Musa sp.* variando pH con tendencia a alcalinidad, puesto que, se ha demostrado que pH entre 10,9 y 11,5 favorece mayormente la formación de AgNPs en periodos de tiempo más cortos [92] y que cada tratamiento se caracterice por DLS, y TEM.

Se recomienda investigar la eficacia de las AgNPs contra una variedad más amplia de patógenos vegetales, evaluando diferentes diámetros y concentraciones para determinar las condiciones óptimas de aplicación. Es fundamental realizar estudios a largo plazo sobre los efectos residuales de las AgNPs en el medio ambiente y la fisiología de las plantas. Además, explorar las interacciones moleculares entre AgNPs y patógenos proporcionará una comprensión más profunda de sus mecanismos de acción, permitiendo desarrollar estrategias fitopatológicas más efectivas y sostenibles. La integración de esta nanotecnología en la agricultura podría revolucionar el manejo de enfermedades, mejorando la productividad y sostenibilidad agrícola.

Se sugiere evaluar el efecto de AgNPs en el enraizamiento de *Musa sp.*, ya que estudios indican mejoras significativas en el número y longitud de raíces en cultivos *in vitro* de banano con la adición de AgNPs al medio de cultivo, beneficiando el proceso de enraizamiento [93].

## REFERENCIAS

- [1] FAO, “Perspectiva a mediano plazo de la producción y el comercio mundial de bananos y frutas tropicales”, *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación para la Agricultura*, oct. 2020, doi: 10.4060/CC7285EN.
- [2] FAO, “Análisis del mercado del plátano: resultados preliminares 2019”. Consultado: el 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/ca7567es/CA7567ES.pdf>
- [3] FAOSTAT, “Base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura”. Consultado: el 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/TCL>
- [4] D. R. Ort *et al.*, “Redesigning photosynthesis to sustainably meet global food and bioenergy demand”, *Proceedings of the national academy of sciences*, vol. 112, núm. 28, pp. 8529–8536, 2015.
- [5] D. S. Meredith y J. S. Lawrence, “Black leaf streak disease of bananas (*Mycosphaerella fijiensis*): symptoms of disease in Hawaii, and notes on the conidial state of the causal fungus”, *Transactions of the British Mycological Society*, vol. 52, núm. 3, pp. 459-IN16, 1969.
- [6] Higuera Inocencio, *Hacia dónde va la ciencia en México. Ecosistemas, Plagas y Cambio Climático*, Primera. CONACYT/ Academia Mexicana de Ciencias A.C./ Consejo Consultivo de Ciencias, 2015.
- [7] C. de J. Alarcón, “Análisis de la síntesis química y verde de nanopartículas de óxidos metálicos: ventajas y desventajas”, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Puebla, 2022.
- [8] Rai M, Yadav A, y Gade A, “Nanopartículas de plata como nueva generación de antimicrobianos”, en *Avances de la biotecnología*, Primera., 2009, pp. 76–83.
- [9] J. A. Sandoval, G. Brenes, y L. Pérez Sánchez, “Micropropagación de plátano y banano (*Musa AAB*, *AAA*) en el CATIE”, 1991.
- [10] S. M. Tamimi y H. Othman, “Silver Nanoparticles for Enhancing the Efficiency of Micropropagation of Banana (*Musa acuminata* L.)”, *Trop Life Sci Res*, vol. 34, núm. 2, p. 161, 2023.

- [11] A. Medina, “Conozca las enfermedades y plagas del plátano y cómo evitarlas.”, Jiffy Group ES. Consultado: el 28 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://jiffygroup.com/es/noticias/conozca-las-enfermedades-y-plagas-del-platano-y-como-evitarlas/>
- [12] W. T. Nishijima, *Compendium of tropical fruit diseases*. APS Press, 1998.
- [13] F. Bakry, F. Carreel, C. Jenny, y J.-P. Horry, “Genetic improvement of banana”, en *Breeding plantation tree crops: tropical species*, Springer, 2009, pp. 3–50.
- [14] F. F. Clairmonte, “World banana economy: Problems and prospects”, *Econ Polit Wkly*, pp. 277–292, 1976.
- [15] L. Victoria Penaranda Gonzalez, J. Rivera Cano, S. Gomez Posada, J. Camilo Torres Romero, y M. Francisco Polanco Puerta, “Relevant conditions for micropropagation by direct organogenesis in triploid varieties (aab) of plantain explants (*Musa spp.*)”, *Int J Adv Res (Indore)*, vol. 10, núm. 03, pp. 382–393, mar. 2022, doi: 10.21474/IJAR01/14401.
- [16] M. L. Orozco y M. Aristizábal, “Manejo de las sigatokas del plátano (*Musa AAB*) y su relación con el clima. Universidad de Caldas. Departamento de Fitotecnia. Resumen de investigación”, *Boletín Fitotecnia*, núm. 110, 2006.
- [17] D. G. Alwindia, T. Kobayashi, K. T. Natsuaki, y S. Tanda, “Inhibitory influence of inorganic salts on banana postharvest pathogens and preliminary application to control crown rot”, *Journal of General Plant Pathology*, vol. 70, pp. 61–65, 2004.
- [18] J. Llontop, “Nuevas tendencias en el control de enfermedades de banano orgánico”, *Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú*, 2009.
- [19] G. Rodríguez, “Manejo de la pudrición de la corona en banano orgánico. Trabajo de Graduación. Ingeniero agrónomo”, *EARTH. Guácimo, CR*, 1999.
- [20] W. R. Slabaugh y M. D. Grove, “Postharvest diseases of bananas and their control.”, *Plant Dis*, vol. 66, núm. 8, pp. 746–750, 1982.
- [21] P. Kaur, R. Thakur, J. S. Duhan, y A. Chaudhury, “Management of wilt disease of chickpea *in vivo* by silver nanoparticles biosynthesized by rhizospheric microflora of chickpea (*Cicer arietinum*)”, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 93, núm. 11, pp. 3233–3243, 2018.

- [22] N. Mahendran, B. Anand, M. Rajarajan, A. Muthuvel, y V. Mohana, “Green synthesis, characterization and antimicrobial activities of silver nanoparticles using *Cissus quadarangularis* leaf extract”, *Mater Today Proc*, vol. 49, pp. 2620–2623, 2022.
- [23] F. Fatima, S. R. Verma, N. Pathak, y P. Bajpai, “Extracellular mycosynthesis of silver nanoparticles and their microbicidal activity”, *J Glob Antimicrob Resist*, vol. 7, pp. 88–92, 2016.
- [24] P. Tamilarasi y P. Meena, “Green synthesis of silver nanoparticles (Ag NPs) using *Gomphrena globosa* (Globe amaranth) leaf extract and their characterization”, *Mater Today Proc*, vol. 33, pp. 2209–2216, 2020.
- [25] N. Bouzakher-Ghomrasni, C. Chivas-Joly, F. Testard, y O. Taché, “Dimensional measurement of TiO<sub>2</sub> particles in powder form by SAXS and SEM”, en *SFNano-C’Nano*, 2019.
- [26] C. A. SC, D. S. AL, M. Galazzi, A. Azevedo, y Z. Arruda, “Nanoparticles Applied To Plant Science: A Review”.
- [27] D. G. Do, T. K. T. Dang, T. H. T. Nguyen, T. D. Nguyen, T. T. Tran, y D. D. Hieu, “Effects of nano silver on the growth of banana (*Musa spp.*) cultured *in vitro*”, *Journal of Vietnamese Environment*, vol. 10, núm. 2, pp. 92–98, 2018.
- [28] M. T. K. El-Mahdy, A. A. Radi, y M. M. Shaaban, “Impacts of exposure of banana to silver nanoparticles and silver ions *in vitro*”, *Middle East J Appl Sci*, vol. 9, núm. 3, pp. 727–740, 2019.
- [29] P. Peharec Štefanić, K. Košpić, D. M. Lyons, L. Jurković, B. Balen, y M. Tkalec, “Phytotoxicity of silver nanoparticles on tobacco plants: Evaluation of coating effects on photosynthetic performance and chloroplast ultrastructure”, *Nanomaterials*, vol. 11, núm. 3, p. 744, 2021.
- [30] M. H. Siddiqui, M. H. Al-Wahaibi, y F. Mohammad, “Nanotechnology and plant sciences”, *Springer International Publishing Switzerland. DOI*, vol. 10, pp. 973–978, 2015.
- [31] A. Sirelkhatim *et al.*, “Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism”, *Nanomicro Lett*, vol. 7, pp. 219–242, 2015.

- [32] N. P. Truong, M. R. Whittaker, C. W. Mak, y T. P. Davis, “The importance of nanoparticle shape in cancer drug delivery”, *Expert Opin Drug Deliv*, vol. 12, núm. 1, pp. 129–142, 2015.
- [33] M. Gumustas, C. T. Sengel-Turk, A. Gumustas, S. A. Ozkan, y B. Uslu, “Effect of polymer-based nanoparticles on the assay of antimicrobial drug delivery systems”, en *Multifunctional systems for combined delivery, biosensing and diagnostics*, Elsevier, 2017, pp. 67–108.
- [34] S. S. Sana y L. K. Dogiparthi, “Green synthesis of silver nanoparticles using Givotia moluccana leaf extract and evaluation of their antimicrobial activity”, *Mater Lett*, vol. 226, pp. 47–51, 2018.
- [35] R. de la C. Esquivel-Figueroa y S. M. Mas-Diego, “Síntesis biológica de nanopartículas de plata: revisión del uso potencial de la especie *Trichoderma*”, *Revista Cubana de Química*, vol. 33, núm. 2, pp. 23–45, 2021.
- [36] C. F. Bohren y D. R. Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons, 2008.
- [37] J. Car y N. Krstulović, “Analytical Model for Determination of Size-Distribution of Colloidal Silver Nanoparticles from Surface Plasmon Resonance Wavelength and Dielectric Functions”, *Nanomaterials*, vol. 12, núm. 19, p. 3474, 2022.
- [38] X. Shen, Q. Yuan, H. Liang, H. Yan, y X. He, “Hysteresis effects of the interaction between serum albumins and silver nanoparticles”, *Sci China B Chem*, vol. 46, pp. 387–398, 2003.
- [39] X. Liu, M. Atwater, J. Wang, y Q. Huo, “Extinction coefficient of gold nanoparticles with different sizes and different capping ligands”, *Colloids Surf B Biointerfaces*, vol. 58, núm. 1, pp. 3–7, 2007.
- [40] Microtrac.es, “Dispersión de luz dinámica (DLS)”. Consultado: el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.microtrac.es/es/productos/dispersion-de-luz-dinamica/>
- [41] N. A. Díaz *et al.*, “Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas”, *Universidad de Córdoba*, pp. 1–8, 2010.
- [42] Carroll J y Flinn B, “Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) - Tecnología y análisis”. Consultado: el 2 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:

<https://es.jsheld.com/perspectivas/art%C3%ADculos-4xp/tecnolog%C3%ADa-y-an%C3%A1lisis-de-infrarrojos-por-transformada-de-fourier>.

- [43] J. E. Arcila-Galvis, R. E. Arango, J. M. Torres-Bonilla, y T. Arias, “The mitochondrial genome of a plant fungal pathogen *Pseudocercospora fijiensis* (Mycosphaerellaceae), comparative analysis and diversification times of the Sigatoka disease complex using fossil calibrated phylogenies”, *Life*, vol. 11, núm. 3, p. 215, 2021.
- [44] A. C. L. Churchill, “*Mycosphaerella fijiensis*, the black leaf streak pathogen of banana: progress towards understanding pathogen biology and detection, disease development, and the challenges of control”, *Mol Plant Pathol*, vol. 12, núm. 4, pp. 307–328, may 2011, doi: 10.1111/j.1364-3703.2010.00672.x.
- [45] A. R. Huda-Shakirah, N. M. I. Mohamed Nor, L. Zakaria, Y.-H. Leong, y M. H. Mohd, “*Lasiodiplodia theobromae* as a causal pathogen of leaf blight, stem canker, and pod rot of *Theobroma cacao* in Malaysia”, *Sci Rep*, vol. 12, núm. 1, p. 8966, 2022.
- [46] J. E. A. Santos *et al.*, “First report of *Lasiodiplodia brasiliensis* causing crown rot on banana in Brazil”, *Plant Dis*, vol. 107, núm. 8, p. 2538, 2023.
- [47] P. F. Cannon, U. Damm, P. R. Johnston, y B. S. Weir, “*Colletotrichum* – current status and future directions”, *Stud Mycol*, vol. 73, pp. 181–213, sep. 2012, doi: 10.3114/sim0014.
- [48] F. Liu *et al.*, “Updating species diversity of *Colletotrichum*, with a phylogenomic overview”, *Stud Mycol*, vol. 101, núm. 1, pp. 1–56, 2022.
- [49] P. P. Kashyap, B. A. Dodke, A. G. Moon, G. D. Umak, D. P. Kalode, y L. Jaunjare, “A Review of Banana Plant: A Boon to Humankind”, *World Journal of Pharmaceutical Research*, vol. 7, núm. 13, pp. 250–258, 2018.
- [50] P. L. Linta Vincent, “Micropropagation in banana using inflorescence: A review”, 2018.
- [51] E. E. Cheesman, “Classification of the bananas. III. Critical notes on species”, *Kew Bull.*, vol. 5, núm. 2, pp. 151–152, 1950.

- [52] G. K. Rana, Y. Singh, S. P. Mishra, y H. K. Rahangdale, “Potential use of banana and its by-products: A review”, *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, vol. 7, núm. 6, pp. 1827–1832, 2018.
- [53] B. C. Adedayo, G. Oboh, S. I. Oyeleye, y T. A. Olasehinde, “Antioxidant and antihyperglycemic properties of three banana cultivars (*Musa spp.*)”, *Scientifica (Cairo)*, vol. 2016, núm. 1, p. 8391398, 2016.
- [54] A. Rani y S. Kumar, “Tissue culture as a plant production technique for medicinal plants: a review”, en *International Conference on Innovative Research in Science, Technology and Management*, 2017, pp. 784–795.
- [55] C. A. Espinosa-Leal, C. A. Puente-Garza, y S. García-Lara, “In vitro plant tissue culture: means for production of biological active compounds”, *Planta*, vol. 248, pp. 1–18, 2018.
- [56] J. Das y P. Velusamy, “Biogenic synthesis of antifungal silver nanoparticles using aqueous stem extract of banana”, *Nano Biomed Eng*, vol. 5, núm. 1, pp. 34–38, 2013.
- [57] T. Kokila, P. S. Ramesh, y D. Geetha, “Biosynthesis of silver nanoparticles from Cavendish banana peel extract and its antibacterial and free radical scavenging assay: a novel biological approach”, *Appl Nanosci*, vol. 5, pp. 911–920, 2015.
- [58] “Python Releases for Windows”. Consultado: el 9 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.python.org/downloads/windows/>
- [59] I. {Statgraphics Technologies, “Statgraphics Centurion 19”. Consultado: el 8 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.statgraphics.com/download19>
- [60] P. E. Russell, “Fungicide resistance action committee (FRAC): A resistance activity update”, *Outlooks on Pest Management*, vol. 20, núm. 3, pp. 122–125, 2009.
- [61] N. Hussein, “Effects of nutrient media constituents on growth and development of banana (*Musa spp.*) shoot tips cultured in vitro”, *Afr J Biotechnol*, vol. 11, núm. 37, pp. 9001–9006, 2012.
- [62] T. Classic Murashige y F. Skoog, “A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures”, *Physiol. Plant*, vol. 15, pp. 473–497, 1962.
- [63] D. R. D. Reddy, D. Suvarna, y D. M. Rao, “Effects of 6-benzyl amino purine (6-BAP) on in vitro shoot multiplication of Grand Naine (*Musa sp.*)”, *Int. J. advanced Biotech. & research*, vol. 5, núm. 1, pp. 36–42, 2014.

- [64] J. P. Gallo Ramírez y C. P. Ossa Orozco, “Fabricación y caracterización de nanopartículas de plata con potencial uso en el tratamiento del cáncer de piel”, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 37, núm. 1, pp. 88–104, 2019.
- [65] Arenas Ramos Cristina, “Síntesis de nanopartículas metálicas a partir de extractos de raspo de uva”, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2017.
- [66] S. S. Bag, A. Bora, y A. K. Golder, “Biomimetic synthesis of silver nanoparticles using bhimkol (*Musa balbisiana*) peel extract as biological waste: Its antibacterial activity and role of ripen stage of the peel”, *Current Nanomaterials*, vol. 5, núm. 1, pp. 47–65, 2020.
- [67] C. Huo, M. Khoshnamvand, C. Liu, H. Wang, P. Liu, y C.-G. Yuan, “Roles of silver nanoparticles adsorbed ions and nanoparticles’ size in antimicrobial activity of biosynthesized silver nanoparticles”, *Mater Res Express*, vol. 6, núm. 12, p. 1250a6, 2019.
- [68] O. Stavinskaya, I. Laguta, T. Fesenko, y M. Krumova, “Effect of temperature on green synthesis of silver nanoparticles using *Vitex agnus-castus* extract”, *Chemistry Journal of Moldova*, vol. 14, núm. 2, pp. 117–121, 2019.
- [69] X. C. Jiang, W. M. Chen, C. Y. Chen, S. X. Xiong, y A. B. Yu, “Role of temperature in the growth of silver nanoparticles through a synergetic reduction approach”, *Nanoscale Res Lett*, vol. 6, pp. 1–9, 2011.
- [70] M. E. Villanueva, “Interacción de nanopartículas con sistemas organizados que revisten interés en nanobiociencias”.
- [71] T. Wriedt, “Mie theory: a review”, *The Mie theory: Basics and applications*, pp. 53–71, 2012.
- [72] D. A. Cruz, M. C. Rodríguez, J. M. López, V. M. Herrera, A. G. Orive, y A. H. Creus, “Nanopartículas metálicas y plasmones de superficie: una relación profunda”, *Avances en ciencias e ingeniería*, vol. 3, núm. 2, pp. 67–78, 2012.
- [73] D. Wang, S. C. Pillai, S.-H. Ho, J. Zeng, Y. Li, y D. D. Dionysiou, “Plasmonic-based nanomaterials for environmental remediation”, *Appl Catal B*, vol. 237, pp. 721–741, 2018.
- [74] L. Pardo, J. Arias, y P. Molleda, “Elaboración de nanopartículas de plata sintetizadas a partir de extracto de hojas de romero (*Rosmarinus officinalis* L.) y su uso como

- conservante”, *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 35, núm. 1, pp. 45–58, 2022.
- [75] K. B. Mogensen y K. Kneipp, “Size-dependent shifts of plasmon resonance in silver nanoparticle films using controlled dissolution: monitoring the onset of surface screening effects”, *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 118, núm. 48, pp. 28075–28083, 2014.
- [76] X. Chen, J. Fu, J. Li, B. Chen, L. Yang, y Z. Li, “Green synthesis of submicron copper powder with narrow particle size distribution via a simple methanol thermal reduction”, *Dalton Transactions*, vol. 50, núm. 46, pp. 17301–17307, 2021.
- [77] L. Gañán, E. Álvarez, y J. Castaño-Zapata, “Identificación genética de aislamientos de *Colletotrichum spp.* causantes de antracnosis en frutos de aguacate, banano, mango y tomate de árbol”, *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat*, vol. 39, núm. 152, pp. 339–347, 2015.
- [78] K. L. Macías Sánchez, H. D. R. González Martínez, R. Carrera Cerritos, y J. C. Martínez Espinosa, “In vitro evaluation of the antifungal effect of AgNPs on *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici*”, *Nanomaterials*, vol. 13, núm. 7, p. 1274, 2023.
- [79] L. E. Pasiche Abad, “Control de hongos asociados a la pudrición de la corona y detección del inóculo primario en frutos de banano orgánico de exportación en Piura”, 2018.
- [80] P. Ghadam, P. Mohammadi, y A. A. Ali, “Silver-based nanoantimicrobials: Mechanisms, ecosafety, and future perspectives”, en *Silver nanomaterials for agri-food applications*, Elsevier, 2021, pp. 67–99.
- [81] J. A. Cervantes-Chávez *et al.*, “Biogenic Silver Nanoparticles and Stressors Generate Synergistic Growth Inhibition in *Candida* Species through Cell Wall Damage, Osmotic Stress, and Oxidative Stress”, *Curr Pharm Biotechnol*, vol. 24, núm. 13, pp. 1682–1693, 2023.
- [82] A. Abdel-Hadi *et al.*, “Myco-synthesis of silver nanoparticles and their bioactive role against pathogenic microbes”, *Biology (Basel)*, vol. 12, núm. 5, p. 661, 2023.

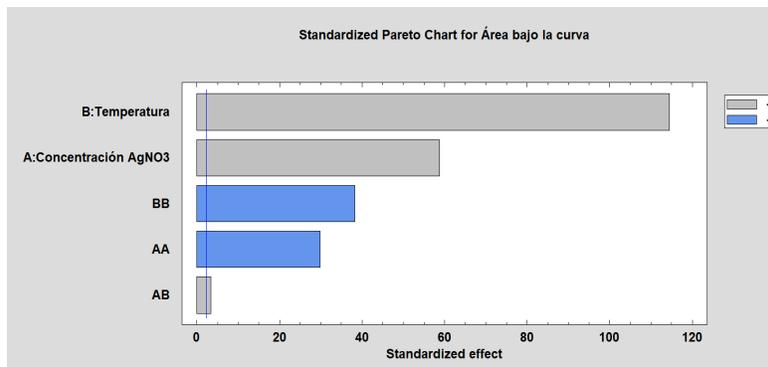
- [83] H. Rizwana *et al.*, “Phytofabrication of silver nanoparticles and their potent antifungal activity against Phytopathogenic fungi”, *Processes*, vol. 10, núm. 12, p. 2558, 2022.
- [84] I. Vera-Reyes *et al.*, “Inhibition of phytopathogenic and beneficial fungi applying silver nanoparticles in vitro”, *Molecules*, vol. 27, núm. 23, p. 8147, 2022.
- [85] D. A. Przhevalskaya *et al.*, “Effect of silver nanoparticles synthesized by ‘Green’ Methods on the growth of in vitro culture of *Betula pendula* L. whole plants”, *Open Agric J*, vol. 16, núm. 1, 2022.
- [86] M. N. Helaly, M. A. El-Metwally, H. El-Hoseiny, S. A. Omar, y N. I. El-Sheery, “Effect of nanoparticles on biological contamination of in vitro cultures and organogenic regeneration of banana”, *Aust J Crop Sci*, vol. 8, núm. 4, pp. 612–624, 2014.
- [87] H. Fazal, B. H. Abbasi, N. Ahmad, y M. Ali, “Elicitation of medicinally important antioxidant secondary metabolites with silver and gold nanoparticles in callus cultures of *Prunella vulgaris* L.”, *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 180, pp. 1076–1092, 2016.
- [88] S. M. Tamimi, “Effects of ethylene inhibitors, silver nitrate ( $\text{AgNO}_3$ ), cobalt chloride ( $\text{CoCl}_2$ ) and aminooxyacetic acid (AOA), on in vitro shoot induction and rooting of banana (*Musa acuminata* L.)”, *Afr J Biotechnol*, vol. 14, núm. 32, pp. 2511–2516, 2015.
- [89] E. Navarro *et al.*, “Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi”, *Ecotoxicology*, vol. 17, pp. 372–386, 2008.
- [90] M. A. Medina, C. L. Medina, y L. K. Medina, “Propagación in vitro de *Musa acuminata* (Simmunds) plátano bocadillo del Chocó, Colombia, a partir del cultivo de meristemas apicales”, *Rev Biodivers Neotrop*, vol. 5, núm. 1, pp. 47–53, 2015.
- [91] R. Sreelekshmi, S. Muthukrishnan, S. Bhagya, T. Parimelazhagan, y E. A. Siril, “Silver Nanoparticles for the In Vitro Production of Phytochemicals”, en *Nanophytomedicine*, CRC Press, 2022, pp. 107–114.
- [92] F. M. Martinez, E. Zuñiga, y A. K. Sanchez Lafarga, “Método de síntesis de nanopartículas de plata adaptable a laboratorios de docencia relacionado con la

nanotecnología”, *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, vol. 6, núm. 10, pp. 101–108, 2013.

- [93] S. A. A. Elsayh, R. N. Arafa, G. A. Ali, W. B. Abdelaal, R. A. Sidky, y T. I. M. Ragab, “Impact of silver nanoparticles on multiplication, rooting of shoots and biochemical analyses of date palm Hayani cv. by *in vitro*”, *Biocatal Agric Biotechnol*, vol. 43, p. 102400, 2022.

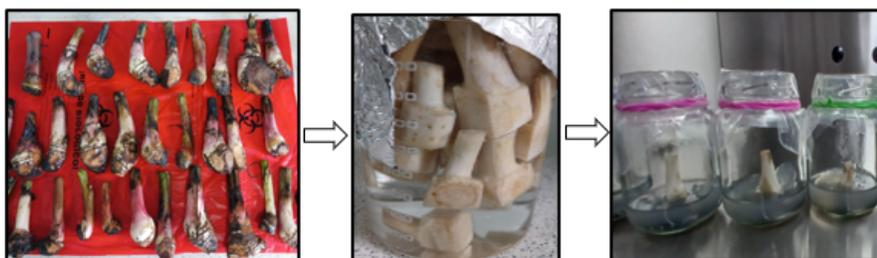
## ANEXOS

### Anexo A. Información generada por la validación estadística: Síntesis verde de AgNPs



**Fig. 11** Gráfico de diagrama de Pareto estandarizado.  
**Nota:** Fuente propia usando Statgraphics Centurion.

### Anexo B. Procedimiento Ilustrado para el corte de cormos en el cultivo *in vitro* de *Musa sp.*



**Fig. 12** Selección de material vegetal, corte de cormo y siembra en medio de cultivo.  
**Nota:** Fuente propia.



**Fig. 13** Cultivo vegetal obtenido posterior a 2 meses sin adición de AgNPs  
**Nota:** Fuente propia.