



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA**

**REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA RESISTENCIA A FUNGICIDAS EN *MYCOSPHAERELLA FIJENSIS* Y ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS EMERGENTES PARA SU MANEJO EN LA PRODUCCIÓN DE BANANO**

*Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero (a) en biotecnología*

**AUTORES:**

SERGIO ALEJANDRO ESPINOZA GUZMÁN  
SELENA ISABEL QUINTANILLA GÓMEZ

**TUTOR:**

M. Sc. VERÓNICA ESTEFANÍA MONTENEGRO BENALCÁZAR

**GUAYAQUIL-ECUADOR**

**2024**

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Nosotros, Sergio Alejandro Espinoza Guzmán con documento de identificación N° 0954671004 y Selena Isabel Quintanilla Gómez con documento de identificación N° 0953548880; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 26 de agosto del año 2024

Atentamente,

---

Sergio Alejandro Espinoza Guzmán  
CI: 0954671004

---

Selena Isabel Quintanilla Gómez  
CI: 0953548880

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Sergio Alejandro Espinoza Guzmán con documento de identificación N° 0954671004 y Selena Isabel Quintanilla Gómez con documento de identificación N° 0953548880, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto de investigación: “REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA RESISTENCIA A FUNGICIDAS EN *MYCOSPHAERELLA FIJIENSIS* Y ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS EMERGENTES PARA SU MANEJO EN LA PRODUCCIÓN DE BANANO”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero/a en Biotecnología, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de agosto del año 2024  
Atentamente,

---

Sergio Alejandro Espinoza Guzmán  
CI: 0954671004

---

Selena Isabel Quintanilla Gómez  
CI: 0953548880

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Verónica Estefanía Montenegro Benalcázar con documento de identificación N° 0604114546, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA RESISTENCIA A FUNGICIDAS EN *MYCOSPHAERELLA FIJIENSIS* Y ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS EMERGENTES PARA SU MANEJO EN LA PRODUCCIÓN DE BANANO”, realizado por Sergio Alejandro Espinoza Guzmán con documento de identificación N° 0954671004 y Selena Isabel Quintanilla Gómez con documento de identificación N° 0953548880, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo Experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de agosto del año 2024  
Atentamente,

---

M.Sc. Verónica Estefanía Montenegro Benalcázar  
CI: 0604114546

## **DEDICATORIA SERGIO ESPINOZA**

A mi madre, Sandra Guzmán, el pilar fundamental de mi existencia. Desde mis primeros pasos hasta este logro que hoy celebro, has sido la luz que guía mi camino, el refugio en los momentos difíciles y la voz que siempre me impulsa a seguir adelante. Sin tu amor incondicional, sacrificio y sabiduría, no hubiese logrado ser la persona que soy hoy.

A José Gualpa, quien ha sido un gran apoyo en mi vida, brindándome su cariño y sabiduría en cada etapa de mi crecimiento. Aunque no eres mi padre biológico, has cumplido ese rol con un corazón generoso y un compromiso inquebrantable. Gracias por ser el ejemplo de integridad y bondad que siempre quise seguir.

A Jesús Gualpa, quien desde el cielo guía mis pasos. Sé que me acompañas en cada desafío desde lo alto. Tu recuerdo es un faro que ilumina mi camino y me inspira a ser mejor cada día, con la certeza de que cada logro que alcanzo te honra a ti también.

A mis hermanos, Leandro y Matteo, compañeros de vida y de sueños. Ustedes han sido una fuente inagotable de alegría y motivación. En cada risa compartida y en cada conversación profunda, encontré el impulso necesario para seguir adelante.

A Eliana Banes, mi pilar y mi apoyo incondicional en todo este proceso. Tu fortaleza, comprensión y amor han sido el sostén en los momentos más difíciles, y tu fe en mí ha sido el motor que me impulsó a no rendirme.

Y a mis amigos, Johannes, Kevin, Nayelly, Sebasthiane, Ana, Nicole, Vivian, Tiffany, Jorge y Anthony, quienes han sido parte esencial de este viaje. A lo largo de este proceso, su amistad ha sido un refugio y un bálsamo para el alma. Los momentos compartidos, las risas y los desafíos enfrentados juntos han enriquecido mi vida de maneras que no puedo expresar con palabras. Gracias por estar ahí, por ser parte de mi historia, y por hacer que este camino sea más llevadero y lleno de memorias que atesoraré por siempre.

## **DEDICATORIA SELENA QUINTANILLA**

Dedico este trabajo a mi amada familia Quintanilla Gómez, quienes han sido mi mayor apoyo y motivación en cada paso de este camino.

A mis padres, Galo Quintanilla y Katia Gómez, por su amor infinito, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, y por ser el pilar fundamental en mi vida. Este logro es una extensión de su sacrificio y dedicación.

A mi hermano, Galo, y a su esposa, Samanta, por su cariño y por estar siempre presentes. A mis sobrinos, quienes llenan de alegría nuestras vidas y nos recuerdan la importancia de luchar por un mejor futuro.

A mis abuelitos, tanto paternos como maternos, que con su sabiduría y amor han dejado una huella imborrable en mi corazón. Su ejemplo ha sido una guía constante en mi vida.

## **AGRADECIMIENTO SERGIO ESPINOZA**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, institución que me ha brindado una formación integral, no solo en el ámbito académico, sino también en valores y principios que me han guiado a lo largo de este camino. Gracias por ser un espacio donde el conocimiento y el crecimiento personal se encuentran.

A Selena Quintanilla, mi compañera de tesis, quien ha sido una aliada incondicional en este proceso. Juntos hemos enfrentado desafíos, compartido ideas y superando obstáculos, siempre con el objetivo de alcanzar la excelencia.

A la M.Sc. Verónica Montenegro, nuestra tutora, quien con su guía y conocimiento nos ha orientado en cada etapa de este trabajo. Su paciencia, sabiduría y apoyo han sido cruciales para el desarrollo de nuestra investigación. Gracias por creer en nosotras y por impulsarnos a dar siempre lo mejor.

Al M.Sc. Kevin Cedeño, quien nos proporcionó el tema de nuestra tesis, y con ello, la oportunidad de explorar un área de estudio que ha enriquecido profundamente nuestro conocimiento. Gracias por su confianza y por abrirnos las puertas a este interesante desafío.

A la M.Sc. Brenda Lopez, M.Sc. Jairo Jaime, M.Sc. Alejandra de la Cruz, Ph.D. José Ballesteros y M.Sc. Jaime Naranjo, quienes con su conocimiento y experiencia han contribuido de manera significativa a la realización de esta tesis. Sus enseñanzas y consejos han sido de gran valor, y su apoyo ha sido esencial para lograr los objetivos propuestos.

## **AGRADECIMIENTO SELENA QUINTANILLA**

En primer lugar, le agradezco a Dios por ser mi guía y fortaleza en todo momento. Gracias por darme la salud, el entendimiento y la perseverancia necesarios para alcanzar esta meta. Sin tu bendición, este logro no habría sido posible. Agradezco profundamente cada lección, cada obstáculo superado y cada oportunidad que me ha permitido crecer y llegar hasta aquí. Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte esencial de este proyecto y de mi formación académica.

A mis padres, Galo Quintanilla y Katia Gómez, quienes han sido mi pilar de apoyo incondicional en cada paso de este camino. Su amor, sacrificio y confianza en mí han sido la fuerza que me ha impulsado a superar cada desafío.

A mis queridas amigas, Isabella Almeida y Helen Correa, por su amistad, por estar siempre a mi lado, y por compartir conmigo momentos de alegría y apoyo en los momentos difíciles. Su compañía ha hecho este trayecto mucho más llevadero. A mi compañero de tesis, Sergio Espinoza, porque, a pesar de las dificultades, no se rindió, fue persistente y logramos salir adelante. Fue de mucha ayuda y apoyo, inspirándome a seguir formándome de manera profesional.

A la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), por brindarme la oportunidad de formarme en un entorno académico de excelencia. Agradezco profundamente a mis profesores, quienes con su dedicación y sabiduría me guiaron en este proceso: M.Sc. Verónica Montenegro, Kevin Cedeño, Jaime Naranjo, Jairo Jaime, Brenda López, y Alejandra de la Cruz. Gracias por compartir su conocimiento y por su compromiso con mi educación.

De manera especial, al Ph.D. José Luis Ballesteros, director de carrera, por su liderazgo y orientación durante mi formación. Su apoyo y consejo han sido invaluable en mi desarrollo como profesional.



## RESUMEN

La Sigatoka negra, causada por el hongo patógeno *Mycosphaerella fijiensis*, es una de las mayores amenazas para la producción global de banano, reduciendo la productividad hasta en un 50%. La resistencia creciente del patógeno a los fungicidas químicos ha intensificado este problema, elevando los costos de producción en un 35% y afectando un sector que genera aproximadamente 12 mil millones de dólares anuales a nivel mundial. Este estudio revisa la eficacia de estrategias biotecnológicas emergentes, como la modificación genética de plantas de banano, que han mostrado una efectividad del 90% en la resistencia a *M. fijiensis*. Se llevo a cabo una revisión exhaustiva sobre la resistencia a fungicidas en *M. fijiensis* y las estrategias biotecnológicas emergentes, se realizó un proceso de selección de estudios en varias etapas. Se identificaron 27,458 artículos relevantes en siete bases de datos, como ScienceDirect, PubMed, Web of Science, Google Scholar, NCBI, MDPI y Scopus, utilizando cuatro criterios de búsqueda. Tras aplicar filtros y eliminar duplicados con el software Data Ladder, se seleccionaron 76 documentos clave para un análisis detallado. Se usaron herramientas como VOSviewer para identificar patrones de colaboración, citaciones y tendencias en la investigación.

**PALABRAS CLAVE:** *Mycosphaerella fijiensis*; fungicida; resistencia; control.

## **ABSTRACT**

Black Sigatoka, caused by the fungal pathogen *Mycosphaerella fijiensis*, is one of the biggest threats to global banana production, reducing productivity by up to 50%. The pathogen's growing resistance to chemical fungicides has intensified this problem, raising production costs by 35% and affecting a sector that generates approximately \$12 billion annually globally. This study reviews the efficacy of emerging biotechnological strategies, such as the genetic modification of banana plants, which have shown a 90% effectiveness in resistance to *M. fijiensis*. An exhaustive review was carried out on fungicide resistance *in M. fijiensis* and emerging biotechnological strategies, a selection process of studies was carried out in several stages. A total of 27,458 relevant articles were identified in seven databases, such as ScienceDirect, PubMed, Web of Science, Google Scholar, NCBI, MDPI, and Scopus, using four search criteria. After applying filters and removing duplicates with Data Ladder software, 76 key documents were selected for detailed analysis. Tools such as VOSviewer were used to identify patterns of collaboration, citations, and trends in research.

**KEY WORDS:** *Mycosphaerella fijiensis*; fungicide; resistance; control.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo I .....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del Problema .....	2
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Hipótesis .....	6
Capítulo II .....	7
2. Marco Teórico.....	7
2.1 Industria Bananera.....	7
2.1.1 Importancia económica del banano .....	7
2.1.2 Principales países productores y exportadores .....	8
2.2 Origen y Taxonomía del Banano.....	10
2.3 Sigatoka Negra: Una amenaza a la producción bananera.....	11
2.3.1 Origen y taxonomía del patógeno.....	12
2.3.2 Impacto económico y social de la Sigatoka negra.....	13
2.3.3 Ciclo de vida de <i>Mycosphaerella fijiensis</i> .....	14

2.3.4 Mutaciones asociadas a la resistencia a fungicidas.....	15
2.4 Estrategias de Control de la Sigatoka Negra .....	18
2.4.1 Control Químico .....	18
2.4.2 Control cultural .....	18
2.4.3 Controles biotecnológicos emergentes .....	19
Capítulo III.....	21
3. Metodología .....	21
3.1 Estrategia Metodológica .....	21
Capítulo IV.....	27
4. Resultados .....	27
4.1 Selección de estudios.....	27
4.2 Comparativa de estrategias de control.....	31
5. Discusión.....	37
6. Conclusiones.....	39
7. Recomendaciones .....	40
8. Bibliografía .....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Principales países productores de banano.....	8
<b>Tabla 2.</b> Principales países exportadores de banano.....	9
<b>Tabla 3</b> Clasificación taxonómica del banano .....	11
<b>Tabla 4.</b> Clasificación taxonómica de la sigatoka negra.....	13
<b>Tabla 5.</b> Cambios en la secuencia de la proteína CYP51 de <i>Mycosphaerella fijiensis</i> por país. .17	
<b>Tabla 6</b> Resultados de la búsqueda de información en bases de datos utilizando palabras clave y conectores booleanos, con y sin filtros de criterios de inclusión. ....	28
<b>Tabla 7.</b> Análisis de estrategias de control químico. ....	32
<b>Tabla 8.</b> Análisis de estrategias de control cultural. ....	33
<b>Tabla 9.</b> Análisis de estrategias de control biotecnológicas. ....	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución de <i>Mycosphaerella fijiensis</i> . .....	12
<b>Figura 2.</b> Ciclo de vida de <i>Mycosphaerella fijiensis</i> .....	15
<b>Figura 3.</b> Sustituciones de aminoácidos identificadas en la enzima 14 $\alpha$ -desmetilasa de <i>Pseudocercospora fijiensis</i> . .....	16
<b>Figura 4.</b> Flujo de trabajo para la selección y análisis de artículos científicos en la revisión sistemática.....	27
<b>Figura 5.</b> Distribución de resultados filtrados por criterios de inclusión en diferentes bases de datos .....	29
<b>Figura 6.</b> Red de coautoría en la investigación sobre <i>Mycosphaerella fijiensis</i> . .....	29
<b>Figura 7.</b> Mapa de calor de citaciones de investigaciones sobre <i>Mycosphaerella fijiensis</i> y resistencia a fungicidas. ....	30
<b>Figura 8.</b> Mapa de palabras clave en la investigación de <i>Mycosphaerella fijiensis</i> y resistencia a fungicidas. ....	31
<b>Figura 9.</b> Comparación de la Efectividad de Diferentes Estrategias de Control para <i>Mycosphaerella fijiensis</i> . ....	34
<b>Figura 10.</b> Costo Estimado por Hectárea de Diferentes Estrategias de Control para <i>Mycosphaerella fijiensis</i> . ....	36

# Capítulo I

## 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

La Sigatoka negra, causada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis*, representa una de las amenazas más significativas para la producción de banano a nivel global. Este patógeno provoca manchas necróticas en las hojas de las plantas, afectando severamente su capacidad fotosintética y, por ende, reduciendo el peso del racimo hasta un 50% provocando una pérdida de hasta el 100% de la producción de exportación (Guzmán & Paladines, 2017). La dependencia de clones de banano como el Cavendish, altamente susceptibles a esta enfermedad, exagera la problemática (Arango et al., 2016).

En la última década, el manejo de la Sigatoka negra se ha vuelto cada vez más complejo debido al desarrollo de resistencia del hongo a diversos fungicidas. Este fenómeno se atribuye principalmente a mutaciones en el gen CYP51, el cual codifica para la enzima 14 $\alpha$ -demetilasa, un componente esencial en la biosíntesis de ergosterol, una molécula crucial para la integridad de la membrana celular del hongo. Las mutaciones en el gen CYP51 han reducido significativamente la eficacia de los fungicidas triazólicos, que han sido una herramienta fundamental en el control químico de la enfermedad (Manzo-Sánchez et al., 2017).

Los avances en la secuenciación del genoma han permitido la identificación de genes y efectores relacionados con la resistencia y virulencia del hongo. La identificación de un homólogo del gen CfAvr4, que desencadena una respuesta hipersensible en bananos resistentes, sugiere potenciales estrategias para el mejoramiento genético de bananos (Arango et al., 2016).

Tradicionalmente, el control de la Sigatoka negra ha dependido en gran medida del uso intensivo de fungicidas químicos. Sin embargo, la creciente resistencia del hongo a estos

tratamientos ha llevado a la búsqueda de alternativas más sostenibles y efectivas. Las estrategias de manejo integrado de plagas (MIP) que combinan diferentes métodos de control han ganado relevancia. Entre estas estrategias se incluyen la rotación y mezcla de fungicidas con diferentes modos de acción, la implementación de prácticas culturales para reducir la incidencia de la enfermedad, y el uso de agentes biológicos y biopesticidas (Ditisa, 2024).

En este contexto, las innovaciones biotecnológicas emergen como soluciones prometedoras. Una de las estrategias más avanzadas es la modificación genética de las plantas de banano para conferirles resistencia a *Mycosphaerella fijiensis*. Esto se ha logrado mediante la introducción de genes de resistencia específicos que pueden impedir la infección o limitar el desarrollo del patógeno en las plantas (Gilberto et al., 2017; European Patent Office, 2018). Estas innovaciones no solo buscan mejorar el control de la enfermedad, sino también reducir la dependencia de fungicidas químicos.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

La Sigatoka negra, causada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis*, es uno de los mayores desafíos para la producción de banano a nivel mundial. Este patógeno compromete significativamente la capacidad fotosintética de las plantas, reduciendo la producción y calidad del fruto. Según datos de FAOSTAT (2022), la industria del banano genera alrededor de 12 mil millones de dólares anuales, con una tendencia al alza. Sin embargo, la creciente incidencia de la Sigatoka negra amenaza la estabilidad de esta industria, impactando negativamente en la economía de los principales países productores (FAOSTAT, 2022; Guzmán & Paladines, 2017).

El control de la Sigatoka negra ha supuesto un gasto considerable para los productores de banano. Se estima que los costos anuales relacionados con el manejo de esta enfermedad ascienden a cientos de millones de dólares, equivalente a más del 35% de los costos totales de producción



anual (Muñoz Pérez, 2018). Esta inversión no solo afecta la rentabilidad de las plantaciones, sino que también repercute en los precios del banano en el mercado global. La creciente resistencia del hongo a los fungicidas químicos ha exacerbado el problema, aumentando la frecuencia y cantidad de aplicaciones necesarias para mantener la enfermedad bajo control (Manzo, 2018).

Diversos factores contribuyen a la resistencia de *M. fijiensis* a los fungicidas. El uso repetido e indiscriminado de estos productos ejerce una presión selectiva sobre las poblaciones del hongo, promoviendo la supervivencia de cepas resistentes (Chávez Navarrete, 2015). Además, la capacidad del hongo para mutar y adaptarse rápidamente complica aún más los esfuerzos de control. Estas mutaciones permiten al hongo evadir los efectos de los fungicidas, reduciendo significativamente su eficacia (PLOS Genetics, 2024).

En esta investigación nos enfocaremos en la necesidad de encontrar soluciones sostenibles y efectivas para el control de la Sigatoka negra. Las innovaciones biotecnológicas, como la modificación genética de plantas de banano para conferirles resistencia a *M. fijiensis*, representan una alternativa prometedora a los fungicidas químicos tradicionales (CAB International, 2024). Evaluar y comparar la eficacia de estas estrategias emergentes permitirá desarrollar prácticas de manejo más eficientes y sostenibles, beneficiando tanto a los productores como al medio ambiente. Estas innovaciones son cruciales para garantizar la continuidad y estabilidad de la producción bananera global, mitigando el impacto económico y ambiental de esta devastadora enfermedad (PLOS Genetics, 2024).

El objetivo de este estudio es evaluar de forma sistemática la eficacia de las estrategias biotecnológicas desarrolladas para el manejo de la resistencia a fungicidas en *M. fijiensis* en la producción de banano. Para lograr esto, se llevará a cabo un análisis bibliométrico de la literatura existente sobre la resistencia del hongo a fungicidas. Además, se comparará de manera sistemática

la eficacia de diversas estrategias biotecnológicas para el manejo de la resistencia, en relación con otros métodos de manejo como controles químicos y culturales (Burgos Canul, 2019; Chávez Navarrete, 2015).

### **1.3 Justificación**

La resistencia a fungicidas en *Mycosphaerella fijiensis* y las estrategias biotecnológicas emergentes para su manejo en la producción de banano surge de la necesidad de abordar uno de los desafíos fitosanitarios más graves en la agricultura global. La Sigatoka negra, causada por este hongo, ha demostrado ser particularmente devastadora, comprometiendo la productividad y sostenibilidad de las plantaciones de banano. La constante evolución del hongo y su creciente resistencia a los fungicidas químicos tradicionales han motivado a la comunidad científica y agrícola a explorar alternativas innovadoras y sostenibles para controlar esta enfermedad (FAOSTAT, 2022; Guzmán & Paladines, 2017).

Estudiar este tema es de suma importancia debido a la magnitud del impacto económico y social que tiene la producción de banano. Con una industria que genera aproximadamente 12 mil millones de dólares anuales a nivel mundial, el control efectivo de la Sigatoka negra es crucial para garantizar la estabilidad económica de los países productores y la seguridad alimentaria global. Además, la alta dependencia de clones de banano, como el Cavendish, que son particularmente susceptibles a esta enfermedad, resalta la urgencia de desarrollar métodos de control que sean efectivos y sostenibles a largo plazo (FAOSTAT, 2022; Arango et al., 2016).

Nuestra investigación pretende contribuir significativamente a este campo, al evaluar sistemáticamente la eficacia de diversas estrategias biotecnológicas para el manejo de la resistencia a fungicidas en *M. fijiensis*, a través de un análisis exhaustivo de la literatura existente y una comparación de diferentes métodos de manejo. Nuestro estudio ofrecerá una visión integral de las

prácticas más prometedoras y eficientes. Este enfoque no solo ayudará a identificar las estrategias más efectivas, sino que también proporcionará una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en el control de la Sigatoka negra (Burgos Canul, 2019; Manzo, 2018).

Finalmente, la viabilidad de este estudio es alta, dado el avance en las técnicas biotecnológicas y la disponibilidad de datos genómicos del hongo y las plantas de banano. La implementación de nuestras recomendaciones podría tener un impacto significativo, no solo en la reducción de los costos asociados con el uso de fungicidas químicos, sino también en la mejora de la sostenibilidad y resiliencia de la producción de banano. Además, el enfoque en estrategias biotecnológicas innovadoras contribuirá a una agricultura más sostenible y menos dependiente de químicos, beneficiando así al medio ambiente y a las comunidades agrícolas (PLOS Genetics, 2024; CAB International, 2024).

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Evaluar de forma sistemática la eficacia de las estrategias biotecnológicas desarrolladas para el manejo de la resistencia a fungicidas en *Mycosphaerella fijiensis* en la producción de banano.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

1. Realizar un análisis bibliométrico de la literatura existente sobre *Mycosphaerella fijiensis* y su resistencia a fungicidas.
2. Comparar de manera sistemática la eficacia de diversas estrategias biotecnológicas para el manejo de la resistencia a fungicidas en *Mycosphaerella fijiensis*, en relación con otros métodos de manejo de la resistencia.

## 1.5 Hipótesis

Las estrategias biotecnológicas emergentes son efectivas para el manejo de la resistencia a fungicidas en *Mycosphaerella fijiensis* en banano en comparación con los métodos convencionales de control.

# Capítulo II

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Industria Bananera

La industria bananera juega un papel crucial en la economía global. Su producción, destinada tanto para la venta en mercados locales como para el autoconsumo, es una actividad esencial que proporciona ingresos regulares a las unidades familiares durante todo el año. La producción de banano se destaca por su dualidad en la economía: por un lado, se cultiva extensivamente para el consumo local y, por otro, una fracción considerable se destina al comercio internacional. (FAOSTAT, 2022).

Esta dualidad refuerza su papel en la economía mundial. Según García Saltos et al (2016), el banano ocupa el segundo lugar en la lista de productos exportables a nivel mundial, después del petróleo, subrayando su relevancia económica global. Esta posición se debe no solo a la demanda constante de los mercados internacionales, sino también a la capacidad del banano para generar ingresos sustanciales a lo largo de la cadena de valor. América Latina es la región líder en la economía mundial del banano, no solo por su participación significativa en el comercio mundial, sino también por su capacidad de respuesta ante las condiciones cambiantes del mercado. Esta región ha demostrado una notable resiliencia y adaptabilidad, lo que le permite mantener una posición dominante en la producción y exportación de banano. (FAOSTAT, 2022; Arango et al., 2016).

#### 2.1.1 Importancia económica del banano

El banano es uno de los cultivos más importantes a nivel global, no solo por su relevancia alimentaria, sino también por su impacto económico en las regiones productoras. Este fruto es la cuarta cosecha alimentaria más valiosa del mundo, lo que lo posiciona como un pilar fundamental

en las economías de muchos países tropicales, especialmente en América Latina, África y Asia. La producción y exportación de banano generan miles de empleos directos e indirectos, contribuyendo significativamente al ingreso nacional de las principales naciones productoras. Además, el banano es una fuente crucial de ingresos para millones de pequeños agricultores que dependen de este cultivo para su subsistencia, así como para las grandes plantaciones que dominan el mercado global. (BASF, 2022).

La importancia económica del banano también se refleja en su papel en la seguridad alimentaria mundial. Como alimento básico en muchas regiones, el banano no solo proporciona nutrientes esenciales, sino que también sostiene la economía de comunidades rurales enteras. La estabilidad del mercado del banano es vital para la economía global, ya que su comercio internacional es uno de los más grandes en el sector de frutas frescas. Sin embargo, esta importancia económica también enfrenta desafíos, como las enfermedades del cultivo y las fluctuaciones del mercado, que amenazan la sostenibilidad del sector y, por ende, la estabilidad económica de las regiones productoras (BASF, 2022).

### 2.1.2 Principales países productores y exportadores

Los países que lideran la producción de banano para consumo interno se encuentran predominantemente en Asia y África, lo que refleja la importancia de este cultivo en las dietas locales y su rol en la economía agrícola de estas regiones.

*Tabla 1. Principales países productores de banano.*

<b>País</b>	<b>Producción (millones de toneladas)</b>
India	34,4
China	11,7
Indonesia	9,2
Nigeria	8
Brasil	6,8

*Nota.* Elaborado por los autores (2024). Tomada de FAOSTAT (2022).

India se destaca como el mayor productor de banano a nivel mundial, con una producción anual de 34,5 millones de toneladas, lo que representa una parte significativa del consumo interno. China e Indonesia también son grandes productores, con 11,7 y 9,2 millones de toneladas, respectivamente. En África, Nigeria es el principal productor con 8 millones de toneladas, mientras que Brasil lidera en América del Sur con 6,8 millones de toneladas. La dinámica del comercio internacional de banano está dominada por países de América Latina y Asia.

**Tabla 2.** Principales países exportadores de banano.

País	Exportación (millones de toneladas)
Ecuador	6,8
Guatemala	2,4
Filipinas	2,3
Colombia	2,2
Costa Rica	2,05

*Nota.* Elaborado por los autores (2024). Tomada de FAOSTAT (2022).

Ecuador es el principal exportador de banano del mundo, con 6,8 millones de toneladas anuales, consolidando su posición como líder global en el comercio de esta fruta. Guatemala, Filipinas, Colombia y Costa Rica también son exportadores significativos, con volúmenes que oscilan entre 2,05 y 2,4 millones de toneladas.

### **2.1.3 Desafíos actuales de la producción del banano.**

La producción de banano enfrenta múltiples desafíos que amenazan su sostenibilidad a largo plazo. Entre los principales problemas se encuentran las enfermedades fitosanitarias, como la Sigatoka negra y la enfermedad de Panamá, causadas por los hongos *Mycosphaerella fijiensis* y *Fusarium oxysporum f. sp. cubense*, respectivamente. Estas patologías han desarrollado resistencia a los tratamientos químicos convencionales, lo que compromete la eficacia de los fungicidas. La

dependencia de monocultivos, particularmente de la variedad Cavendish, aumenta la vulnerabilidad del cultivo a plagas y enfermedades debido a la limitada diversidad genética. Esta situación también restringe las posibilidades de mejoramiento genético para desarrollar variedades resistentes (Savage, 2024).

Los impactos ambientales asociados a la producción intensiva de banano incluyen la contaminación por agroquímicos y la deforestación, que afectan negativamente la biodiversidad y los ecosistemas locales. Además, el cambio climático presenta desafíos adicionales, como alteraciones en los patrones de precipitación y temperaturas extremas, que afectan la productividad y calidad del cultivo (Savage, 2024).

En el ámbito socioeconómico, los pequeños agricultores enfrentan dificultades debido a los bajos precios del mercado internacional, altos costos de producción y acceso limitado a tecnologías avanzadas. Estos factores ponen en riesgo la sostenibilidad económica de las operaciones agrícolas y el bienestar de las comunidades productoras. Estos desafíos interconectados requieren un enfoque integral que aborde aspectos fitosanitarios, agronómicos, ambientales y socioeconómicos para garantizar la sostenibilidad futura de la producción bananera (Savage, 2024).

## **2.2 Origen y Taxonomía del Banano**

El banano, una planta de considerable importancia histórica y económica, tiene sus raíces en el Sudeste Asiático. Las investigaciones arqueobotánicas han revelado que su cultivo se remonta aproximadamente a 10,000 años, con los hallazgos más antiguos localizados en Papúa Nueva Guinea. Este dato subraya la antigüedad del cultivo y su temprana domesticación por las sociedades humanas (Lescot, 2015).



La longevidad y la amplia distribución geográfica del cultivo del banano subrayan su importancia histórica y su profundo arraigo en las prácticas agrícolas y alimentarias de diversas culturas, desde Asia hasta América. Este extenso historial de cultivo ha dado lugar a una considerable diversidad genética y morfológica dentro del género *Musa*, lo que se refleja en su compleja taxonomía (Lescot, 2015).

**Tabla 3** Clasificación taxonómica del banano

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Musaceae
Género	<i>Musa</i>

*Nota.* Elaborado por los autores (2024). Tomado de *Musa* (1MUBG) [overview]. (s/f). Eppo.int.

### 2.3 Sigatoka Negra: Una amenaza a la producción bananera.

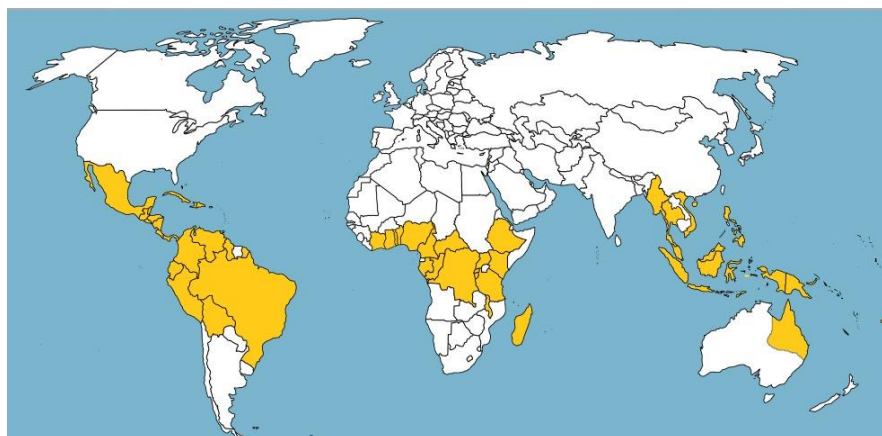
La Sigatoka negra, causada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis*, representa una de las amenazas más significativas para la producción bananera a nivel mundial. Esta enfermedad foliar ha demostrado una notable capacidad de propagación y adaptación, desplazando a otros patógenos foliares del banano en diversas regiones productoras. La severidad de la Sigatoka negra radica en su impacto sobre la salud foliar de las plantas de banano, lo que afecta directamente la productividad y la calidad de la fruta. El patógeno causa lesiones necróticas en las hojas que reducen significativamente la superficie fotosintética, comprometiendo el desarrollo y maduración normal de los racimos (Carlier et al., 2000).

Un aspecto preocupante de *M. fijiensis* es su capacidad para desarrollar resistencia a los fungicidas comúnmente utilizados para su control. Esta característica ha llevado a un aumento en

la frecuencia y dosis de las aplicaciones de productos químicos, incrementando los costos de producción y el impacto ambiental asociado al cultivo del banano (Carlier et al., 2000).

La distribución geográfica de *M. fijiensis* se ha expandido considerablemente desde su descubrimiento, abarcando actualmente las principales zonas bananeras de Asia, África, América Latina y el Caribe. Esta expansión ha sido bien documentada y refleja la alta adaptabilidad del patógeno a diferentes condiciones ambientales (Mourichon & Fullerton, 1990, como se citó en Carlier et al., 2000).

**Figura 1.** Distribución de *Mycosphaerella fijiensis*.



*Nota.* Elaborado por los autores (2024). Tomado de Musa (1MUBG) [overview]. (s/f). Eppo.int.

### 2.3.1 Origen y taxonomía del patógeno.

La sigatoka negra tiene su origen en las Islas Salomón y Nueva Guinea; sin embargo, su primer registro también se documentó en las Islas Fiyi en el año 1963. Se postula que el sudeste asiático constituye el centro de origen de esta patología, lo cual coincide con el centro de diversidad del banano. El primer estudio detallado sobre la enfermedad y su patógeno causante fue realizado por Meredith y Lawrence en 1969 (Gianella, 2021).

La primera incidencia de la sigatoka negra fuera de Asia se reportó en Honduras en 1972 y en Zambia en 1973. En Asia y África, la enfermedad también se conoce como "raya negra".

Durante el periodo de 1973 a 1974, la sigatoka negra se presentó de manera epidémica en Honduras, desde donde se propagó a Belice en 1975, siendo este el segundo registro en América. En el año de 1970, este patógeno fue detectado en Costa Rica, Guatemala, Nicaragua y El Salvador. En 1981, se reportó su presencia en Panamá y Colombia, marcando su primer registro en América del Sur. Posteriormente, se detectó en Ecuador en 1987 y en Venezuela en 1990 (Gianella, 2021).

En términos taxonómicos, el género *Pseudocercospora* pertenece al orden Capnodiales dentro de la clase Dothideomycetes, previamente conocida como Loculoascomycetes. Esta clase es la más grande y diversa entre los hongos ascomicetos, con más de 20,000 especies. Los Dothideomycetes incluyen tanto endófitos y epífitas de plantas como saprobios, los cuales descomponen celulosa y otros carbohidratos complejos en plantas muertas, así como patógenos de plantas (Arango Isaza et al., 2016).

**Tabla 4.** Clasificación taxonómica de la sigatoka negra.

Reino	Fungi
Filo	Ascomycota
Clase	Dothideomycetes
Orden	Mycosphaerellales
Familia	Mycosphaerellaceae
Género	<i>Pseudocercospora</i>
Especie	<i>Pseudocercospora fijiensis</i>

*Nota.* Elaborado por los autores (2024). Tomado de *Pseudocercospora fijiensis* (MYCOFI) [overview]. (s/f). Eppo.int.

### 2.3.2 Impacto económico y social de la Sigatoka negra.

La sigatoka negra ha tenido un impacto económico y social significativo en la producción de banano en Ecuador y otros países productores. Según García Regalado et al. (2019), esta enfermedad representa hasta un 30% del costo total de producción del banano en Ecuador, lo que afecta especialmente a los pequeños productores que no pueden asumir los altos costos de control. El impacto económico se evidencia en la disminución de la superficie plantada de banano en

Ecuador, que se redujo en un 31.75% entre 2002 y 2018. Además, los costos de producción aumentaron un 69.2% en 17 años debido principalmente a los gastos en fumigaciones aéreas para controlar la enfermedad (García Regalado et al., 2019)

A nivel social, la sigatoka negra amenaza la estabilidad laboral y seguridad alimentaria de miles de familias que dependen del cultivo de banano. En Ecuador, esta industria genera empleo para 1 millón de familias y beneficia a 2.5 millones de personas. El control intensivo con fungicidas también tiene impactos ambientales negativos que comprometen la sostenibilidad a largo plazo. Esto podría afectar las exportaciones a mercados que exigen producción sostenible, poniendo en riesgo la principal industria agrícola del país (García Regalado et al., 2019).

### **2.3.3 Ciclo de vida de *Mycosphaerella fijiensis*.**

El ciclo de vida de *Mycosphaerella fijiensis*, agente causal de la Sigatoka negra en banano, comprende tanto reproducción sexual como asexual, completándose en aproximadamente 21 días (Segura, 2018). La reproducción asexual inicia con la formación de conidióforos, cada uno capaz de producir hasta cuatro conidios, que son las estructuras infectivas de esta fase. En la reproducción sexual, se forman espermagonios (parte masculina) generalmente en el envés de las hojas, produciendo espermatia que fertilizan los pseudotecios (parte femenina). Dentro de los pseudotecios se desarrollan ascas, cada una conteniendo ocho ascosporas, que son las estructuras infectivas de la fase sexual.

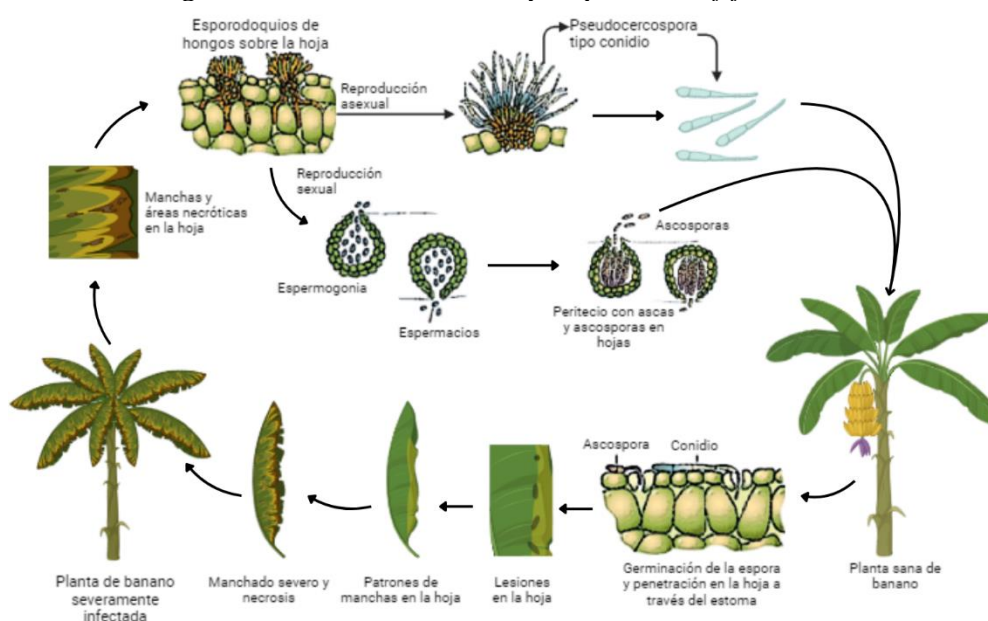
El ciclo de la enfermedad consta de cuatro etapas principales:

- Germinación de esporas (conidios o ascosporas).
- Penetración del huésped a través de las estomas.
- Desarrollo de síntomas (puntos oscuros que evolucionan a manchas).

- Producción de nuevas esporas.

Los síntomas progresan desde pequeñas lesiones hasta la necrosis extensa de la hoja, pudiendo llevar a la defoliación total de la planta. Aunque no es inmediatamente letal, la enfermedad reduce significativamente la capacidad fotosintética, afectando el rendimiento y calidad de la fruta (Segura, 2018).

**Figura 2.** Ciclo de vida de *Mycosphaerella fijiensis*.



*Nota.* Ilustración creada con BioRender.com, por los autores (2024). Adaptada de (Segura, 2018).

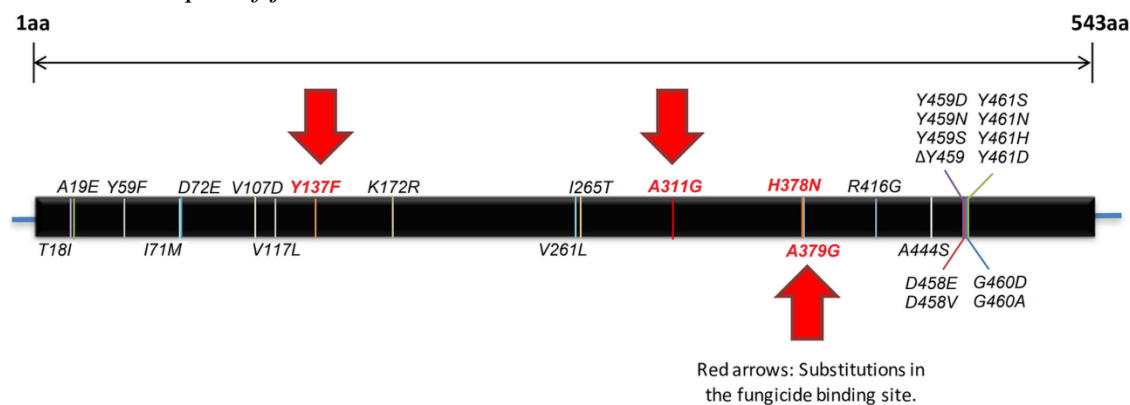
### 2.3.4 Mutaciones asociadas a la resistencia a fungicidas

La resistencia a fungicidas en organismos fitopatógenos se ha convertido en un problema significativo en la agricultura moderna. En particular, en la producción de banano, la aparición de cepas de *Mycosphaerella fijiensis* resistentes a fungicidas representa un desafío crítico para el manejo efectivo de enfermedades como la Sigatoka Negra. El principal mecanismo de resistencia a fungicidas en *M. fijiensis* implica cambios en la secuencia de aminoácidos de la enzima 14 $\alpha$ -

demetilasa (CYP51), que es el objetivo de los inhibidores de la demetilación (DMI). Mutaciones específicas en el gen CYP51 han sido identificadas y correlacionadas con una disminución en la sensibilidad a los fungicidas azoles. Por ejemplo, mutaciones en posiciones como V137A e I379V han mostrado reducir la sensibilidad a triadimenol y tebuconazol, respectivamente, en otros organismos, y se han observado efectos similares en *M. fijiensis*. (Cañas et al, 2009)

Chong et al. (2021) documentaron que en las poblaciones de *M. fijiensis*, las mutaciones como A313G y cambios en la posición 463, son recurrentes en cepas resistentes. Estas mutaciones introducen cambios en la carga y polaridad del sitio posiblemente involucrado en la interacción con el fungicida, lo que puede afectar la afinidad de unión y, por lo tanto, disminuir la sensibilidad al fungicida.

**Figura 3.** Sustituciones de aminoácidos identificadas en la enzima 14 $\alpha$ -desmetilasa de *Pseudocercospora fijiensis*.



*Nota.* Tomado de (Chong et al., 2021)

La heterogeneidad observada en las mutaciones entre las distintas poblaciones sugiere una divergencia evolutiva del patógeno, posiblemente en respuesta a presiones selectivas diferenciadas, incluyendo la exposición variable a fungicidas azoles en diferentes regiones productoras. Estos hallazgos expanden nuestra comprensión de los mecanismos moleculares

subyacentes a la resistencia a fungicidas en *M. fijiensis* y subrayan la complejidad de la adaptación del patógeno a nivel global.

**Tabla 5.** Cambios en la secuencia de la proteína CYP51 de *Mycosphaerella fijiensis* por país.

Sustitución de aminoácido por país	Ecuador	Filipinas	Colombia	Costa Rica
Total de la muestra (n)	40	28	34	33
Inserción del promotor	5 (12.5%)	8 (28.6%)	24 (70.06%)	26 (78.8%)
T18I	40 (100%)	15 (53.6%)	34 (100%)	33 (100%)
A19E	1 (1.5%)	-	1 (2.90%)	-
Y59F	-	-	-	-
I71M	-	2 (7.10%)	-	-
D72E	-	2 (7.10%)	-	-
V107D	40 (100%)	18 (100%)	34 (100%)	33 (100%)
V117L	-	-	-	-
Y137F	-	4 (14.3%)	21 (61.8%)	19 (57.6%)
K172R	-	4 (14.3%)	-	-
V261L	-	-	-	2 (6.1%)
I265T	-	-	-	-
A311G	33 (82.5%)	27 (96.4%)	9 (26.5%)	19 (57.6%)
H378N	-	-	-	3 (9.1%)
A379G	-	-	1 (2.90%)	7 (21.2%)
R416G	-	-	-	-
A444S	-	22 (78.6%)	-	-
D458E	-	15 (53.6%)	-	-
D458V	-	-	-	-
ΔY459	-	2 (7.10%)	-	-
Y459D	2 (5%)	2 (7.10%)	2 (5.9%)	2 (6.1%)
Y459N	-	15 (53.6%)	2 (5.9%)	-
Y459S	-	2 (7.10%)	-	-
G460A	-	-	-	1 (3%)
G460D	-	-	-	-
Y461D	1 (2.5)	6 (21.4%)	21 (61.8%)	22 (66.7%)
Y461H	10 (25%)	-	3 (8.8%)	1(3%)
Y461N	20 (50%)	-	-	2 (6.1%)
Y461S	-	-	-	4 (12.1%)

Nota. Elaborado por los autores (2024). Tomado de (Chong et al., 2021)

## **2.4 Estrategias de Control de la Sigatoka Negra**

### **2.4.1 Control Químico**

El control químico es una de las estrategias más utilizadas en el manejo de la Sigatoka negra debido a su eficacia en la reducción rápida de la incidencia de la enfermedad. Esta estrategia se basa en la aplicación de fungicidas que pueden clasificarse en tres categorías principales: fungicidas de contacto, penetrantes y sistémicos. Los fungicidas de contacto, como los ditiocarbamatos, actúan únicamente en las superficies tratadas, impidiendo la germinación de esporas, pero sin afectar infecciones ya establecidas (Orozco-Santos et al., 2008). Los fungicidas penetrantes, por otro lado, se absorben a través de la cutícula de las hojas, proporcionando un nivel de protección adicional al tejido vegetal. Finalmente, los fungicidas sistémicos, como los benzimidazoles y triazoles, son absorbidos y transportados por toda la planta, lo que les permite actuar tanto de manera preventiva como curativa, aunque su uso excesivo puede conducir al desarrollo de resistencia en los patógenos (Ayala et al., 2014).

El uso intensivo de fungicidas, sin embargo, tiene sus desventajas. La generación de resistencia por parte de los patógenos, los elevados costos de los insumos, y el impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana, son algunos de los problemas asociados a esta estrategia (Jiménez et al., 2009; Mena-Espino y Couoh-Uicab, 2015). En respuesta a estas preocupaciones, se ha propuesto el uso de biofungicidas y fungicidas orgánicos como alternativas más sostenibles, aunque su efectividad aún requiere mayor investigación (Alcívar, 2014).

### **2.4.2 Control cultural**

El control cultural de la Sigatoka negra se centra en prácticas tradicionales que buscan limitar la propagación del hongo y mitigar su impacto en las plantaciones de banano. Entre estas



prácticas, la eliminación de las hojas afectadas es una de las más comunes, ya que reduce la fuente de inóculo del patógeno y, por ende, la diseminación de la enfermedad (Calvo y Bolaños, 2001). Esta técnica, conocida también como deshoje o poda sanitaria, debe realizarse de manera regular, especialmente durante las épocas de mayor humedad, para ser efectiva (Orozco-Santos et al., 2008).

Otra práctica cultural relevante es el manejo del suelo y la materia orgánica, mediante el minicompostaje de los desechos vegetales. Esta técnica no solo acelera la degradación de la materia orgánica infectada, sino que también mejora la fertilidad del suelo y reduce la esporulación del hongo en la plantación (Orozco-Santos et al., 2008). Además, la densidad de siembra es un factor crítico en el manejo de la Sigatoka negra, ya que una alta densidad puede favorecer la propagación de la enfermedad. Por lo tanto, se recomienda mantener una densidad de siembra adecuada que permita una buena aireación y exposición solar, reduciendo así las condiciones favorables para el desarrollo del hongo (Rivas y Rosales, 2003).

Finalmente, el manejo del agua mediante sistemas de riego por goteo puede ayudar a controlar la Sigatoka negra al minimizar la humedad en el follaje y, por ende, la propagación de esporas. Este método de riego también reduce la incidencia de otras enfermedades y malezas, contribuyendo a un manejo más integral y sostenible del cultivo (Orozco-Santos et al., 2008).

### **2.4.3 Controles biotecnológicos emergentes**

Una de las estrategias biotecnológicas emergentes más prometedoras en el manejo de la Sigatoka negra es la transformación genética de cultivares de plátano y banano para conferirles resistencia al patógeno *Mycosphaerella fijiensis*. Este enfoque involucra la inserción de genes que codifican proteínas antifúngicas, como las quitinasas y glucanasas, que degradan la pared celular del hongo, inhibiendo su crecimiento y proliferación. La efectividad de esta técnica se ha

demostrado en ensayos controlados, donde las plantas modificadas genéticamente mostraron una resistencia significativa a la Sigatoka negra en comparación con las variedades no transformadas (Riveros & Romero, 2005).

Esta estrategia presenta un enfoque sostenible y a largo plazo para la gestión de la enfermedad, evitando el uso intensivo de fungicidas químicos y reduciendo el impacto ambiental asociado. Sin embargo, el proceso de transformación genética aún enfrenta desafíos, como la aceptación comercial de las variedades transgénicas y la necesidad de regulaciones específicas que permitan su cultivo y comercialización (Riveros & Romero, 2005).

Otra estrategia biotecnológica emergente que ha mostrado un potencial considerable en el control de la Sigatoka negra es el uso de extractos vegetales con propiedades antifúngicas. Investigaciones recientes han evaluado la actividad antifúngica del extracto etanólico de *Heliotropium indicum* (cola de alacrán), demostrando que este extracto puede inhibir el crecimiento de *Mycosphaerella fijiensis* en diferentes grados, dependiendo de la parte de la planta utilizada. Específicamente, el extracto de rama mostró un 46.82% de inhibición, el de tallo un 40.72%, y el de hoja un 25.18% (Erazo Mendoza, 2024). La efectividad de estos extractos se atribuye a la presencia de metabolitos secundarios, como flavonoides y saponinas, que actúan alterando la integridad de la membrana celular del hongo, lo que eventualmente lleva a su muerte (Erazo Mendoza, 2024).

Este enfoque biotecnológico es especialmente atractivo para los pequeños productores que buscan alternativas más sostenibles y menos costosas que los fungicidas químicos tradicionales. Además, el uso de extractos vegetales ofrece la ventaja de ser un método natural y ecológico, con un menor riesgo de desarrollo de resistencia por parte del patógeno (Erazo Mendoza, 2024).

# Capítulo III

## 3. Metodología

### 3.1 Estrategia Metodológica

**3.1.1 Definición del problema:** El problema central de esta investigación es la necesidad urgente de identificar y evaluar soluciones sostenibles y efectivas para manejar la Sigatoka negra, considerando la resistencia del patógeno a los fungicidas y la viabilidad de las estrategias biotecnológicas emergentes. Esta revisión sistemática tiene como objetivo proporcionar una evaluación crítica y comparativa de estas estrategias, con el fin de ofrecer recomendaciones basadas en evidencia para la implementación de prácticas agrícolas más sostenibles y efectivas en la producción de banano.

**3.1.2 Búsqueda sistemática:** Se realizará una búsqueda exhaustiva de literatura científica en bases de datos reconocidas, como ScienceDirect, PubMed, Web of Science, Google Scholar, NCBI, MDPI y Scopus. Se utilizarán combinaciones de palabras clave como "*Mycosphaerella fijiensis*", "fungicida", "resistencia" y "control". La búsqueda se centrará en estudios publicados en los últimos diez años, con el fin de asegurar la relevancia y actualidad de los datos recopilados.

#### **Criterios de inclusión:**

- Estudios que investiguen la resistencia de *Mycosphaerella fijiensis* a fungicidas.
- Artículos que evalúen estrategias biotecnológicas para el manejo de dicha resistencia, incluyendo la modificación genética de plantas de banano y compuestos naturales.
- Artículos revisados por pares y publicados en revistas científicas indexadas.
- Tesis, patentes, actas de congresos y otros documentos científicos relevantes.

**Criterios de exclusión:**

- Estudios que no se enfoquen en *Mycosphaerella fijiensis*.
- Artículos de opinión, revisiones no sistemáticas, notas técnicas, editoriales y comunicaciones breves sin datos relevantes.
- Fuentes que no estén disponibles en texto completo o que no proporcionen información suficiente para el análisis comparativo.

Este enfoque metodológico permitirá una evaluación rigurosa y sistemática de la literatura existente, asegurando que los estudios incluidos sean relevantes y de alta calidad, contribuyendo a una comprensión integral y actualizada de la eficacia de las estrategias biotecnológicas en el manejo de la resistencia a fungicidas en *Mycosphaerella fijiensis*.

**3.1.3 Organización de la información:** La información recopilada será organizada de acuerdo con su relevancia, fecha de publicación, fiabilidad y pertinencia al tema. Se priorizarán investigaciones recientes y artículos revisados por pares de revistas de gran impacto. La organización de los datos incluirá:

- **Resumen de hallazgos relevantes:** Se elaborará un resumen de los estudios sobre alteraciones genéticas en *Mycosphaerella fijiensis* que contribuyen a la resistencia a fungicidas, destacando las mutaciones en el gen CYP51.
- **Compilación de estrategias biotecnológicas:** Se recopilarán estrategias biotecnológicas como transformación genética y compuestos naturales desarrolladas para manejar la resistencia del patógeno.

- **Comparación sistemática de eficacia:** Se realizará una comparación sistemática de la eficacia de estas estrategias basadas en estudios experimentales y de campo, evaluando su efectividad y viabilidad práctica.
- **Proceso de deduplicado:** Para asegurar la unicidad y precisión de la información analizada, se realizará un proceso de deduplicado utilizando el software Data Ladder. Esta herramienta de acceso libre permitirá identificar y eliminar duplicados en los datos recopilados, garantizando así la integridad y calidad del conjunto de datos final que será utilizado en el análisis.

**3.1.4 Análisis de la información:** Se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los artículos recopilados, con enfoque en:

- **Resultados y conclusiones:** Evaluar los resultados y conclusiones de los estudios sobre la eficacia de diferentes estrategias biotecnológicas.
- **Caracterización genética:** Examinar la caracterización genética de las cepas de *Mycosphaerella fijiensis* resistentes y su impacto en la efectividad de los tratamientos.
- **Evaluación de métodos alternativos:** Identificar los problemas asociados con el uso de fungicidas convencionales y evaluar métodos alternativos de control, destacando sus ventajas y limitaciones.
- **Selección de controles químicos:** Para la evaluación de los controles químicos, se aplicarán criterios específicos en la selección de fungicidas. Se priorizarán aquellos que formen parte de la clase de fungicidas triazólicos, debido a su relevancia en el control de *Mycosphaerella fijiensis*. Además, se seleccionarán productos que

representen tanto el precio más alto como el más bajo dentro de esta categoría, garantizando una visión amplia de las opciones disponibles. Finalmente, se tomarán en cuenta los fungicidas que son los más utilizados en las prácticas agrícolas actuales, con el fin de asegurar la relevancia y aplicabilidad de los resultados obtenidos en la revisión.

**3.1.5 Aplicación Biotecnológica:** Basándose en la revisión y análisis exhaustivos de la información recopilada, se evaluará la implementación de estrategias biotecnológicas específicas para el manejo de la resistencia a fungicidas en *Mycosphaerella fijiensis*. Estas estrategias estarán alineadas con los objetivos específicos del estudio y abarcarán:

- **Uso de compuestos naturales:** Se evaluará el uso de compuestos naturales con actividad antifúngica demostrada. Esto incluirá una revisión de estudios que demuestren su eficacia contra *Mycosphaerella fijiensis*, así como un análisis de su potencial para reducir la dependencia de fungicidas químicos convencionales y minimizar los impactos ambientales y de salud pública.
- **Modificación genética de cultivares de banano:** Se examinarán los estudios relacionados con la modificación genética de cultivares de banano para incrementar su resistencia a *Mycosphaerella fijiensis*. Esto incluirá una evaluación de las técnicas utilizadas y los resultados obtenidos en términos de resistencia a la enfermedad y rendimiento de las plantas.
- **Evaluación comparativa sistemática:** Se llevará a cabo una comparación sistemática de la eficacia de estas estrategias biotecnológicas en relación con otros métodos de manejo de la resistencia más utilizados, tales como controles químicos y

tradicionales. En esta evaluación se tomarán solo 2 métodos de cada categoría (químico, cultural, biotecnológico).

Este enfoque asegurará una comprensión integral y práctica de las estrategias biotecnológicas disponibles para el manejo de la resistencia a fungicidas en *Mycosphaerella fijiensis*, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y prácticas agrícolas más sostenibles.

**3.1.6 Análisis bibliométrico:** Realizar un análisis bibliométrico de la literatura científica sobre *Mycosphaerella fijiensis* y su resistencia a fungicidas implica la aplicación de diversas técnicas estadísticas descriptivas para examinar exhaustivamente los libros, artículos científicos y otros documentos relacionados con este tema. El objetivo principal es evaluar el impacto de las publicaciones, identificar tendencias de investigación y determinar la influencia de autores, instituciones y revistas en este campo específico.

Para este análisis bibliométrico, se toma en cuenta en tres aspectos clave:

- **Análisis de citas para la búsqueda de fuentes primarias:** Evaluar el impacto de las publicaciones mediante el análisis de la frecuencia con la que son citadas por otros trabajos. Esto nos permitirá identificar las fuentes más influyentes en el campo y las investigaciones más relevantes sobre *Mycosphaerella fijiensis* y la resistencia a fungicidas.
- **Redes de coautoría:** Estudiar las relaciones de colaboración entre los autores para identificar patrones de coautoría en la producción científica sobre este tema. Esto nos ayudará a comprender las aportaciones más significativas y los grupos de investigación destacados en el campo.

- **Mapeo de palabras clave:** Analizar las palabras clave más utilizadas en los títulos, resúmenes y cuerpos de los artículos para identificar tendencias y temas emergentes en la investigación. Esto nos proporcionará una visión general de los conceptos más relevantes y las áreas de interés predominantes en la literatura sobre *Mycosphaerella fijiensis* y la resistencia a fungicidas.

Estas técnicas nos permitirán obtener una comprensión completa y actualizada de la investigación en este campo, lo que nos ayudará a identificar áreas de investigación prioritarias y a tomar decisiones informadas sobre futuras investigaciones y políticas científicas. Para llevar a cabo este análisis, utilizaremos VOSviewer, una herramienta poderosa y versátil para visualizar y analizar datos bibliométricos.

**3.1.7 Propuesta de investigación futura:** Identificar las brechas en el conocimiento actual y proponer áreas para futuras investigaciones. Esto incluirá la necesidad de estudios a largo plazo sobre la eficacia de las estrategias biotecnológicas y la evaluación de nuevas innovaciones en el manejo de la resistencia a fungicidas.



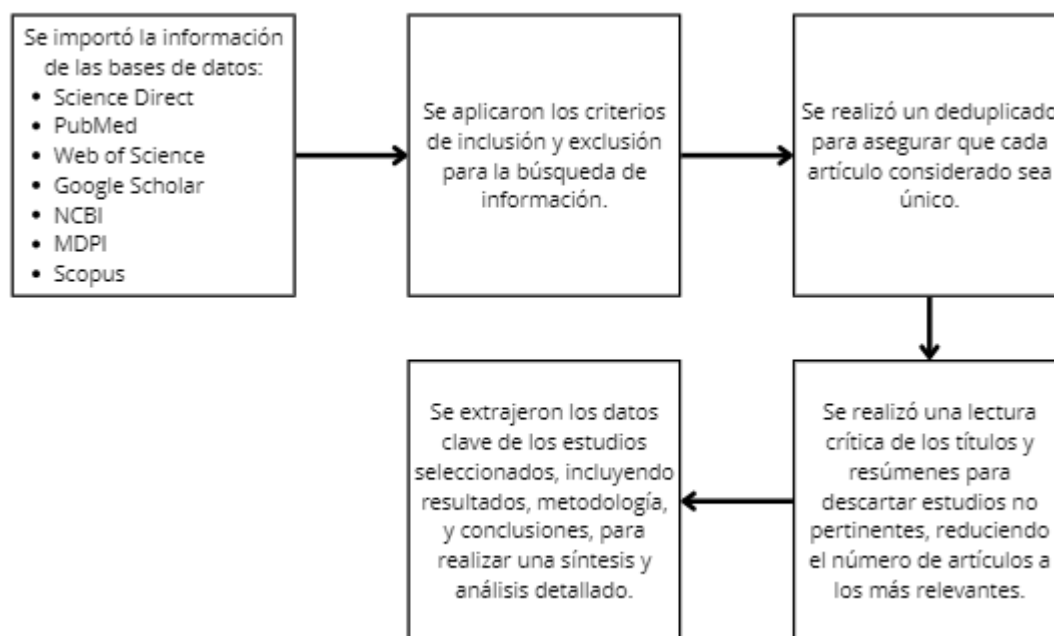
## Capítulo IV

### 4. Resultados

#### 4.1 Selección de estudios

Para garantizar una revisión exhaustiva y relevante de la literatura sobre la resistencia a fungicidas en *Mycosphaerella fijiensis* y las estrategias biotecnológicas emergentes para su manejo en la producción de banano, se siguió un riguroso proceso de selección de artículos, estableciendo criterios de inclusión claros y se realizaron búsquedas exhaustivas en diversas bases de datos.

**Figura 4.** Flujo de trabajo para la selección y análisis de artículos científicos en la revisión sistemática



*Nota.* Elaborado por los autores (2024).

En la tabla 6 se observa los resultados de una búsqueda de información realizada en siete bases de datos: ScienceDirect, PubMed, Web of Science, Google Scholar, NCBI, MDPI y Scopus. Utilizando cuatro criterios de búsqueda principales relacionados con la resistencia de

*Mycosphaerella fijiensis* a fungicidas y estrategias de manejo, se identificaron un total de 27,458 artículos sin aplicar filtros y 13,262 artículos tras la aplicación de filtros específicos. Google Scholar se destacó por ofrecer la mayor cantidad de resultados sin filtros, con 24,590 artículos, mientras que bases de datos como PubMed y NCBI, más especializadas, mostraron una notable reducción en el número de documentos luego de aplicar los filtros.

**Tabla 6** Resultados de la búsqueda de información en bases de datos utilizando palabras clave y conectores booleanos, con y sin filtros de criterios de inclusión.

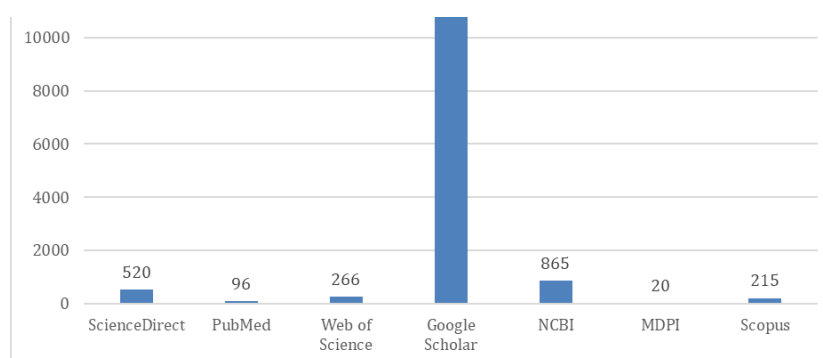
Búsqueda	Base de datos Criterio	ScienceDirect		PubMed		Web of Science		Google Scholar		NCBI		MDPI		Scopus	
		Sin Filtro	Con Filtro	Sin Filtro	Con Filtro	Sin Filtro	Con Filtro	Sin Filtro	Con Filtro	Sin Filtro	Con Filtro	Sin Filtro	Con Filtro	Sin Filtro	Con Filtro
Mycosphaerella Fijiensis AND Sigatoka Negra		208	105	82	52	120	120	5600	2340	235	210	3	3	232	89
Sigatoka Negra AND Resistencia		300	171	41	24	73	73	8310	3760	306	275	7	7	156	62
Sigatoka Negra AND Resistencia AND Fungicida		161	89	14	8	32	32	3500	1740	131	114	5	5	46	27
Sigatoka negra AND Resistencia AND control		275	155	18	12	41	41	7180	3440	311	266	5	5	66	37
	Total	944	520	155	96	266	266	24590	11280	983	865	20	20	500	215

*Nota.* Elaborado por los autores (2024).

Se observó una reducción significativa en el número de documentos en todas las bases de datos, lo que refleja la importancia de los filtros para refinar los resultados y asegurar la relevancia de los estudios seleccionados. En Google Scholar, los resultados disminuyeron considerablemente, de 24,590 a 11,280 documentos, y en ScienceDirect, la reducción fue de 944 a 520 documentos. Esta tendencia sugiere que, aunque bases de datos como Google Scholar ofrecen una amplia cobertura, requieren un filtrado más exhaustivo para obtener resultados más específicos y pertinentes.

En comparación, bases de datos como Scopus y MDPI, a pesar de recuperar un menor número de documentos, proporcionaron resultados más refinados desde el inicio, lo que indica una mayor especificidad en sus búsquedas. Estos resultados subrayan la importancia de seleccionar adecuadamente las bases de datos y aplicar filtros pertinentes para garantizar la calidad y relevancia de los estudios incluidos en la revisión sistemática.

**Figura 5** Distribución de resultados filtrados por criterios de inclusión en diferentes bases de datos

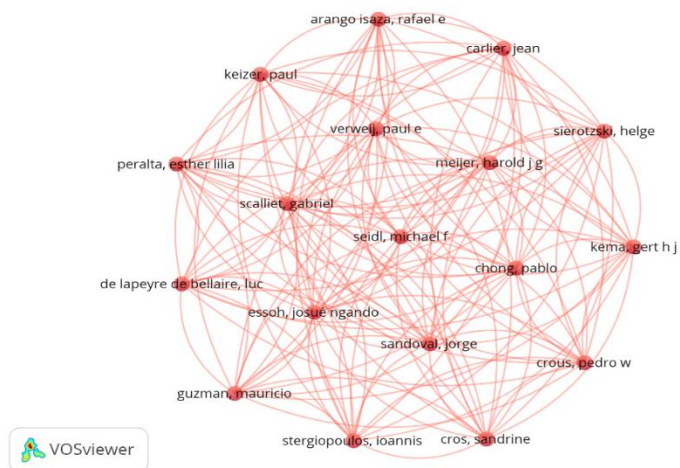


*Nota.* Elaborado por los autores (2024).

Una vez obtenidos estos resultados, se llevó a cabo un proceso de deduplicado mediante el uso del software Data Ladder para asegurar que cada artículo considerado fuese único. Este proceso resultó en la identificación de 76 documentos relevantes a nuestro tema de investigación, que fueron considerados para un análisis más detallado en la revisión sistemática.

Posterior a esto se llevó a cabo un análisis utilizando herramientas como VOSviewer, que permiten visualizar y analizar patrones en la colaboración entre autores, las citas, y las palabras clave más relevantes en este campo de estudio.

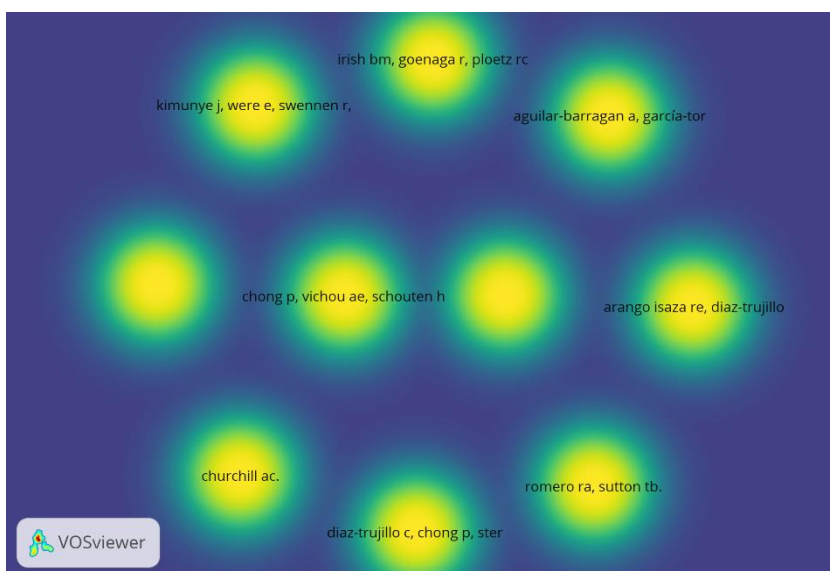
**Figura 6.** Red de coautoría en la investigación sobre *Mycosphaerella fijiensis*



*Nota.* Elaborado por los autores (2024)

La figura 6 ilustra la red de coautoría entre los investigadores que han contribuido de manera significativa al estudio de *Mycosphaerella fijiensis*. Cada nodo representa un autor, y las conexiones entre nodos indican colaboraciones en publicaciones científicas. La densidad de las conexiones entre nodos indican colaboraciones en publicaciones científicas. La densidad de las conexiones refleja un alto grado de colaboración, lo que sugiere la existencia de grupos de investigación bien establecidos en este campo. Esta información es crucial para identificar los autores más influyentes y los grupos de investigación clave que lideran los estudios sobre la resistencia a fungicidas.

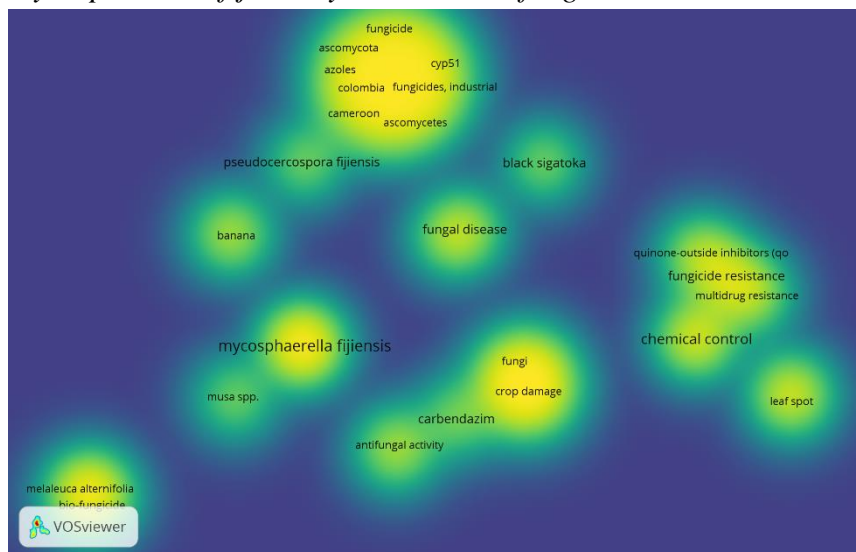
**Figura 7.** Mapa de calor de citas de investigaciones sobre *Mycosphaerella fijiensis* y resistencia a fungicidas



*Nota.* Elaborado por los autores (2024)

La Figura 7 ilustra la distribución de citas entre las publicaciones más relevantes sobre *Mycosphaerella fijiensis*, previamente filtradas por los autores más recurrentes. Las áreas más destacadas reflejan los estudios que han sido citados con mayor frecuencia, lo que señala su influencia significativa en el campo de investigación. La identificación de estos estudios es esencial para comprender los avances clave y los fundamentos teóricos que han orientado la investigación reciente.

**Figura 8.** Mapa de palabras clave en la investigación de *Mycosphaerella fijiensis* y resistencia a fungicidas



Nota. Elaborado por los autores (2024)

La Figura 8 destaca los términos utilizados con frecuencia en los artículos, como "resistencia a fungicidas", "control químico", y "*Mycosphaerella fijiensis*". El análisis de estas palabras clave permite identificar tendencias actuales y áreas emergentes de investigación, proporcionando una visión comprensiva de los temas predominantes en la literatura científica. Aunque términos como "hongo", "CYP51" y "azoles" también son relevantes dentro del contexto del estudio, no cumplen con los criterios necesarios para ser utilizados en el filtrado de información destinada a la investigación.

#### 4.2 Comparativa de estrategias de control.

Con base en el criterio establecido en la metodología para la Selección de controles químicos, se aplicaron criterios específicos en la evaluación de fungicidas. Se priorizaron aquellos que pertenecen a la clase de fungicidas triazólicos, debido a su relevancia en el control de *Mycosphaerella fijiensis*. Asimismo, se seleccionaron productos que representaron tanto el precio más alto como el más bajo dentro de esta categoría, garantizando así una perspectiva amplia de las

opciones disponibles en el mercado. Finalmente, se consideraron los fungicidas más comúnmente utilizados en las prácticas agrícolas actuales, lo que aseguró que los resultados obtenidos fueran tanto relevantes como aplicables a la realidad del sector.

Los productos y sus precios fueron obtenidos a partir de dos proveedores de insumos agrícolas, Agripac y DelMonteag. Los costos estimados se calcularon considerando las 230 mil hectáreas de banano cultivadas en Ecuador (Banano, Plátano y Otras Musáceas – Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, s.f.). El porcentaje de efectividad de estos fungicidas se extrajo del estudio de (Chong et al., 2021).

En la tabla 7 se puede ver el análisis de estrategias de control químico, utilizando fungicidas como Propiconazol y Tebuconazol. Estos productos se aplican en forma foliar con una frecuencia de 6 a 8 ciclos al año, y aunque son relativamente efectivos (50% de efectividad), el costo estimado alcanza los \$4,6 millones por ciclo para Propiconazol y \$1,8 millones por ciclo para Tebuconazol. Usar estas estrategias pueden limitar la efectividad, especialmente considerando la creciente resistencia de *Mycosphaerella fijiensis* a los fungicidas.

**Tabla 7.** Análisis de estrategias de control químico.

Control	Método	Producto	Precio Estim. **	Dosis	Ciclos	Tipo de Fumigación **	Cant. Estim. **	Costo Estim. **	Efectividad **
Químico	Fungicida	Propiconazol	50\$/L	0,4 L/Ha	6 a 8 Ciclos al año	Foliar	20 L mezcla/Ha	\$4,6 Millones x Ciclo	50%
		Tebuconazol	18\$/L	0,4 L/Ha	6 a 8 Ciclos al año	Foliar	20 L mezcla/Ha	\$1,8 Millones x Ciclo	50%

*Nota.* Elaborado por los autores (2024).

La tabla 8 describe dos métodos culturales: Deseje Sanitario y Manejo de Densidad. Ambos métodos son significativamente más económicos que el control químico, con costos estimados de \$33 millones a \$50,6 millones en total, dependiendo del método. El Deseje Sanitario tiene una efectividad de 80 a 90%, mientras que el Manejo de Densidad ofrece una efectividad del 70 a 80%.

**Tabla 8.** Análisis de estrategias de control cultural

Control	Método	Frecuencia	Recursos Necesarios	Duración	Costo Estim. / Ha	Costo total Estim. **	Efectividad **
Cultural	Desoje Sanitario	Cada 15 días	Mano de obra y herramientas	2 días/ Ha	\$150	\$34,5 Millones	80 a 90 %
	Manejo de Densidad	Anualmente	Planeación de la plantación	7 días/ Ha	\$230	\$52,9 Millones	70 a 80 %

*Nota.* Elaborado por los autores (2024). Los costos totales estimados se basan las 230 mil hectáreas de banano que existen en el Ecuador (*Banano, Plátano y Otras Musáceas – Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, s. f.*)

En la Tabla 9 se observan las estrategias biotecnológicas utilizadas para el control de *Mycosphaerella fijiensis*, destacándose la transformación genética del plátano *Musa paradisiaca* (Curaré Enano) como un método altamente efectivo (90%). Este método, al aplicarse a gran escala, tiene un costo estimado por plántula que oscila entre 60 y 80 centavos de dólar, según La Bolsa de Productos (2017), lo que representa una inversión de aproximadamente \$1,000 por hectárea.

Además, si se realiza una inversión en un laboratorio y un invernadero para la multiplicación de meristemas, cuyo costo se estima en \$700 mil, es posible reducir significativamente los costos de adquisición de plántulas.

En cuanto a los compuestos naturales, se presentan como una alternativa más económica con una efectividad variable entre el 25% y el 50%. Se determinó que para la aplicación de estos compuestos se requieren 0.02 litros de extracto por litro de agua. Para la aplicación de esta estrategia se necesita un aproximado de 600 litros de mezcla por hectárea, lo que implica un total de 12 litros de extracto. Considerando que el costo de este tipo de extracto varía entre \$30 y \$50 por litro, se estima un costo total de \$360 por hectárea.

**Tabla 9.** Análisis de estrategias de control biotecnológicas.

Control	Método	Especie Utilizada	Costo De Investigación	Efectividad**	Costo Estimado./Ha
Biotecnológico	Transformación Genética	<i>Musa paradisiaca</i> (Curaré Enano)	\$1.2 Millones	90%	\$1.000
	Compuestos Naturales	<i>Heliotropium indicum</i>	\$1.500	25 - 50%	\$360

*Nota.* Elaborado por los autores (2024). Los costos de investigación fueron extraídos de Fontagro (1999) y Erazo Mendoza (2024).

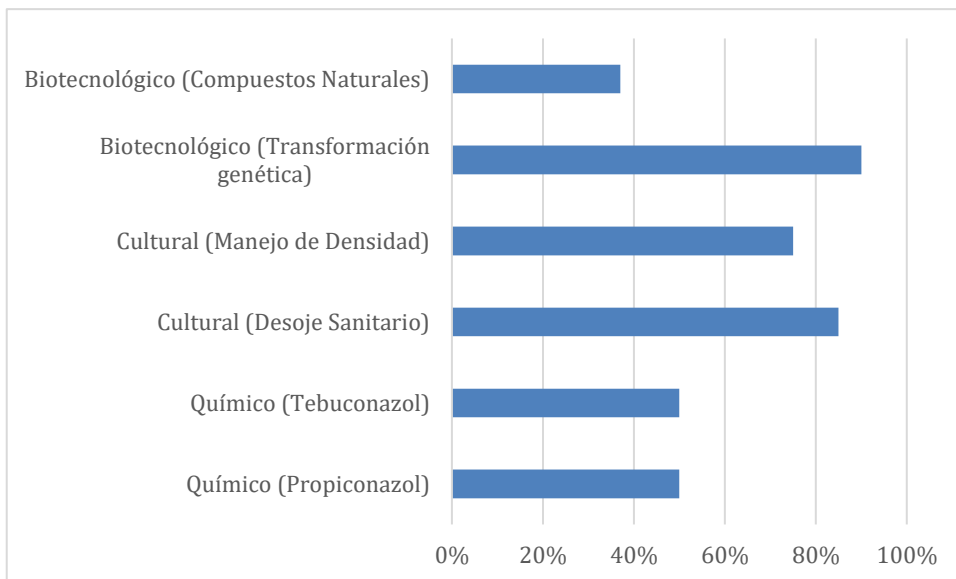
La Figura 9 ilustra una comparativa general de la efectividad de varias estrategias de control utilizadas contra *Mycosphaerella fijiensis*. De las estrategias evaluadas, la transformación genética se destaca por su alta efectividad, cercana al 90%, lo que la posiciona como una de las opciones más prometedoras en términos de control biotecnológico. Por otro lado, los compuestos naturales, aunque más accesibles económicamente, presentan una efectividad significativamente menor, variando entre el 25% y el 50%.

Las estrategias culturales, como el desoje sanitario y el manejo de densidad, muestran una efectividad considerable, alrededor del 90% y 70% respectivamente, subrayando la importancia de prácticas agrícolas adecuadas en el manejo de la enfermedad. Los métodos químicos, representados por el Tebuconazol y el Propiconazol, ofrecen una efectividad moderada del 50%, lo que refleja la creciente resistencia del patógeno a los fungicidas convencionales.

Es importante señalar que la elección de una estrategia de control depende de múltiples variables que incluyen, pero no se limitan a, el costo de implementación, la sostenibilidad a largo plazo, la accesibilidad de los recursos necesarios, y la resistencia del patógeno. La efectividad es un factor clave, pero debe ser evaluada en conjunto con estos otros aspectos para determinar la mejor opción de manejo en diferentes contextos agrícolas.

**Figura 9.** Comparación de la Efectividad de Diferentes Estrategias de Control para *Mycosphaerella fijiensis*





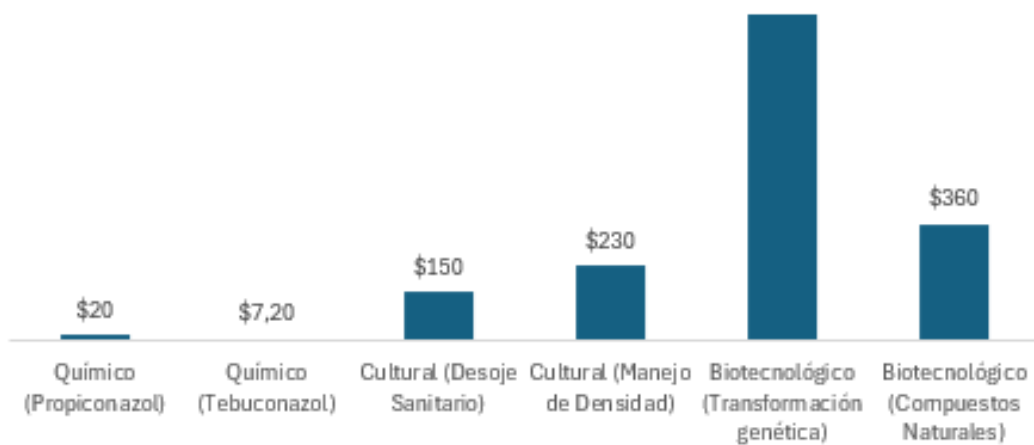
Nota. Elaborado por los autores (2024).

La figura 10 muestra una comparativa entre los métodos evaluados (químico, cultural y biotecnológico), para control de *Mycosphaerella fijiensis*, analizando el costo estimado por hectárea. En esta comparativa, la transformación genética se presenta como el método más costoso a corto plazo, con un costo estimado de \$1,000 por hectárea. Sin embargo, este enfoque ofrece la mayor sostenibilidad a largo plazo, dado que reduce la necesidad de aplicaciones recurrentes y minimiza el riesgo de resistencia del patógeno.

En contraste, los métodos de control químico, representados por el uso de Propiconazol y Tebuconazol, son más económicos, con costos de \$20 y \$7.20 por hectárea. A pesar de su bajo costo inicial, estos métodos se enfrentan a una creciente obsolescencia debido al desarrollo de resistencia por parte del patógeno, lo que limita su efectividad y su viabilidad a largo plazo.

Las estrategias culturales, como el desoje sanitario y el manejo de densidad, ofrecen un equilibrio intermedio en términos de costos, con valores de \$150 y \$230 por hectárea. Estas prácticas, aunque menos costosas que la transformación genética, requieren de mayor tiempo y una planeación y gestión efectiva para obtener buenos resultados.

**Figura 10.** Costo Estimado por Hectárea de Diferentes Estrategias de Control para *Mycosphaerella fijiensis*



Nota. Elaborado por los autores (2024).

## 5. Discusión

Este estudio sistemático ha evaluado distintas estrategias de control de la enfermedad, comparando métodos químicos, culturales y biotecnológicos en términos de costo, efectividad y sostenibilidad. Los hallazgos permiten una discusión profunda sobre la viabilidad y eficiencia de cada enfoque, en el contexto de la creciente resistencia del patógeno a los fungicidas convencionales.

Según el estudio de (Nowakunda et al., 2015), la transformación genética del banano ha demostrado ser una de las estrategias más efectivas para el control de *Mycosphaerella fijiensis*. En particular, el híbrido 'Kiwangaazi', desarrollado y evaluado en Uganda, ha mostrado una resistencia significativa a la Sigatoka negra, con una efectividad cercana al 90%. Esta alta efectividad posiciona la transformación genética como una de las opciones más prometedoras para el control de esta enfermedad. Sin embargo, aunque su implementación a gran escala presenta un costo inicial considerable, la reducción en la necesidad de aplicaciones recurrentes y la minimización del riesgo de resistencia del patógeno sugieren que es una solución sostenible a largo plazo. Comparativamente, esta estrategia supera en efectividad a los fungicidas tradicionales, que muestran una eficacia limitada debido al creciente problema de resistencia.

El estudio realizado por (Otálvaro et al., 2007) sobre compuestos fenilfenalenónicos derivados de *Musa acuminata* var. "Yangambi km 5" ha revelado una notable actividad antifúngica contra *Mycosphaerella fijiensis*, con una inhibición completa del crecimiento micelial a concentraciones de 50-100 ppm. Estos resultados son consistentes con nuestras observaciones, donde los extractos naturales mostraron una inhibición significativa del patógeno, aunque con una efectividad variable entre el 25% y el 50%. A pesar de su potencial, es crucial continuar explorando y optimizando estas formulaciones para aumentar su efectividad y viabilidad comercial. La integración de compuestos naturales en un manejo biotecnológico más amplio podría ofrecer una

alternativa sostenible y aceptable para el control de la Sigatoka negra, aunque se requiere más investigación para perfeccionar estas estrategias.

Con base en los hallazgos de este estudio y la literatura revisada, se hace evidente la necesidad de futuras investigaciones que aborden varios aspectos clave. Es necesario evaluar la efectividad a largo plazo de las estrategias combinadas, integrando métodos culturales, químicos y biotecnológicos, en diferentes condiciones agroecológicas. Además, la aceptación comercial y la optimización de las variedades transgénicas, así como la mejora de los compuestos naturales, son áreas que requieren mayor atención. Finalmente, un análisis exhaustivo de la sostenibilidad y el costo-beneficio de estas estrategias, tanto para pequeños agricultores como para grandes explotaciones comerciales, es esencial para asegurar que las soluciones propuestas sean viables y accesibles a nivel global.

## 6. Conclusiones

Este estudio sistemático ha permitido una exhaustiva recopilación y análisis de la información genética de *Mycosphaerella fijiensis*, el patógeno responsable de la Sigatoka negra, con el objetivo de comprender mejor su mecanismo de resistencia a los fungicidas y su capacidad de adaptación en diversos ambientes. Se identificaron genes clave involucrados en la resistencia, lo que proporciona una base sólida para futuras investigaciones dirigidas al desarrollo de nuevas estrategias de control. Este conocimiento genético es esencial para diseñar enfoques más específicos y efectivos en la lucha contra la Sigatoka negra, ya que permite a los investigadores y productores anticiparse a las mutaciones y desarrollar métodos de control más dirigidos.

A partir de esta comprensión genética, se evaluó y comparó diferentes estrategias de control de la Sigatoka negra, abarcando métodos químicos, culturales y biotecnológicos. Aunque los fungicidas siguen siendo una herramienta valiosa en el manejo de la enfermedad, su uso a largo plazo se ve limitado por el desarrollo de resistencia y los elevados costos asociados. Por otro lado, los métodos culturales, como el desoje sanitario y el manejo de densidad, han demostrado ser alternativas viables y sostenibles, aunque requieren una inversión considerable en tiempo y recursos humanos.

Las estrategias biotecnológicas, que incluyen la transformación genética y el uso de compuestos naturales, representan un enfoque innovador y prometedor. Sin embargo, estas estrategias enfrentan desafíos relacionados con la aceptación comercial y la necesidad de optimización para mejorar su efectividad. A pesar de estos obstáculos, las soluciones biotecnológicas tienen el potencial de reducir la dependencia de fungicidas y ofrecer un manejo más sostenible de la enfermedad.

## 7. Recomendaciones

Es recomendable que las futuras investigaciones se concentren en la mejora de las variedades transgénicas de banano, con el fin de no solo aumentar su resistencia a *Mycosphaerella fijiensis*, sino también optimizar características comerciales esenciales, como el sabor, que actualmente limitan su aceptación en el mercado. Asimismo, es crucial continuar el desarrollo de compuestos naturales, como los extractos, con el objetivo de incrementar su efectividad y consistencia, proporcionando así una alternativa viable y ambientalmente sostenible al uso de fungicidas convencionales.

Se hace imprescindible que estos avances biotecnológicos sean integrados en las prácticas agrícolas mediante programas de capacitación y políticas de apoyo que faciliten la adopción por parte de los productores. Las políticas públicas deben enfocarse en proporcionar incentivos y acceso a estas tecnologías emergentes, garantizando que los agricultores puedan beneficiarse de variedades transgénicas mejoradas y compuestos naturales más eficientes. Este enfoque permitirá reducir la dependencia de los fungicidas tradicionales, mitigando los riesgos de resistencia y promoviendo una producción más sostenible.

Finalmente, se recomienda la realización de estudios a largo plazo que evalúen la efectividad de estas estrategias biotecnológicas en diferentes condiciones agroecológicas y socioeconómicas. Dichos estudios deberían incluir análisis de costo-beneficio para asegurar que las soluciones propuestas sean viables y accesibles en distintos contextos. Además, se sugiere fomentar la colaboración internacional en la investigación sobre la Sigatoka negra, permitiendo un intercambio de conocimientos y el desarrollo de soluciones adaptadas a las necesidades específicas de las regiones productoras de banano a nivel mundial, con miras a un enfoque global y sostenible en la lucha contra esta enfermedad.

## 8. Bibliografía

- Cañas-Gutiérrez, G. P., Angarita-Velásquez, M. J., Restrepo-Flórez, J. M., Rodríguez, P., Moreno, C. X., & Arango, R. (2009). Analysis of the CYP51 gene and encoded protein in propiconazole-resistant isolates of *Mycosphaerella fijiensis*. *Pest Management Science*, 65(8), 892–899. <https://doi.org/10.1002/ps.1770>
- Cavero, P. A. S., Hanada, R. E., Gasparotto, L., Neto, R. A. C., & de Souza, J. T. (2015). Controle biológico da Sigatoka-negra da bananeira com *Trichoderma*. *Ciencia Rural*, 45(6), 951–957. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140436>
- Chong, P., Essoh, J. N., Arango Isaza, R. E., Keizer, P., Stergiopoulos, I., Seidl, M. F., Guzman, M., Sandoval, J., Verweij, P. E., Scalliet, G., Sierotzki, H., de Lapeyre de Bellaire, L., Crous, P. W., Carlier, J., Cros, S., Meijer, H. J. G., Peralta, E. L., & Kema, G. H. J. (2021). A world-wide analysis of reduced sensitivity to DMI fungicides in the banana pathogen *Pseudocercospora fijiensis*. *Pest Management Science*, 77(7), 3273–3288. <https://doi.org/10.1002/ps.6372>
- Churchill, A. C. L. (2011). *Mycosphaerella fijiensis*, the black leaf streak pathogen of banana: Progress towards understanding pathogen biology and detection, disease development, and the challenges of control. *Molecular Plant Pathology*, 12(4), 307–328. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00672.x>
- Espinosa, J. (2015). *Control químico y biológico de Mycosphaerella spp., del cultivo de banano en condiciones de laboratorio.*
- Etebu, E. (2011). Control of black Sigatoka disease: Challenges and prospects. *Article in African Journal of Agricultural Research*.

- FRAC. (2018). *Investigación en resistencia, monitoreo o estrategias y compañías productoras de agroquímicos.*
- Gianella, L. (2021). *Eficiencia de aminos en el control de sigatoka negra (Mycosphaerella fijiensis) en el cultivo de banano (Musa paradisiaca) en el Campus La María.*
- Kogel, K.-H. (2018). *ARNi para el control de hongos y oomicetos fitopatógenos mediante la inhibición de la expresión de genes CYP51 (2675362).* Oficina Española de Patentes y Marcas. <https://doi.org/10.07.2013>
- León, R. (2009). *Determinación de los efectos de productos comerciales obtenidos a base de cítricos y de neem para el manejo de sigatoka negra y su agente causal (mycosphaerella fijiensis morelet).*
- Manzo Sánchez, G., Guzmán González, S., Mónica, C., García, R., Andrew, /, Mario, J. /, & Santos, O. (2005). *BIOLOGÍA DE MYCOSPHAERELLA FIJENSIS MORELET Y SU INTERACCIÓN CON MUSA SPP. Revista Mexicana de Fitopatología, 87–96.*
- Marín, D. H., Monte, D., Produce, F., Romero, R. A., Brands, C., Guzmán, M., & Sutton, T. B. (2003). *Black Sigatoka: An increasing threat to Banana Cultivation.* [www.theodora.com/maps](http://www.theodora.com/maps),
- Marín Douglas. (2018). *Control Químico para el Manejo Integrado de la Sigatoka negra.*
- Oliveira, T. Y. K., Silva, T. C., Moreira, S. I., Christiano, F. S., Gasparoto, M. C. G., Fraaije, B. A., & Ceresini, P. C. (2022). Evidence of Resistance to QoI Fungicides in Contemporary Populations of *Mycosphaerella fijiensis*, *M. musicola* and *M. thailandica* from Banana Plantations in Southeastern Brazil. *Agronomy, 12(12).* <https://doi.org/10.3390/agronomy12122952>



- Orozco-Santos, M., Orozco-Romero, J., Pérez-Zamora, O., Manzo-Sánchez, G., Farías-Larios, J., Da, W., & Moraes, S. (2008). Prácticas culturales para el manejo de la Sigatoka negra en bananos y plátanos. In *Tropical Plant Pathology* (Vol. 189, Issue 3).
- Torres, J., Rodríguez, H., Rodríguez, E., & Arango, R. (2009). Aspectos bioquímicos de la resistencia del banano (*Musa acuminata*) al ataque del hongo *Mycosphaerella fijiensis* Morelet. *Revista Tumbaga*, 85–96. [www.cib.org](http://www.cib.org).
- Nowakunda, Kephass & Barekye, Alex & Ssali, Reuben & Namaganda, Josephine & Tushemereirwe, Wilberforce & Nabulya, Gertrude & Erima, Rockefeller & Akankwasa, Kenneth & Hilman, Edison & Batte, Michael & Karamura, Deborah. (2015). ‘Kiwangaazi’ (syn ‘KABANA 6H’) Black Sigatoka Nematode and Banana Weevil Tolerant ‘Matooke’ Hybrid Banana Released in Uganda. *HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science*. 50. 621-623. [10.21273/HORTSCI.50.4.621](https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.4.621).
- Otálvaro, F., Nanclares, J., Vásquez, L. E., Quiñones, W., Echeverri, F., Arango, R., & Schneider, B. (2007). Phenalenone-Type Compounds from *Musa acuminata* var. “Yangambi km 5” (AAA) and Their Activity against *Mycosphaerella fijiensis*. *Journal Of Natural Products*, 70(5), 887-890. <https://doi.org/10.1021/np070091e>
- Red Internacional para el Mejoramiento del Banano y el Plátano - INIBAP, Corporación para Investigaciones Biológicas-CIB, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE, Corporación Bananera Nacional –CORBANA, & Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del CINVESTAV-México. (1999). *Desarrollo de cultivares de plátano resistentes a la Sigatoka negra para América Latina*. Fontagro. [https://www.fontagro.org/wp-content/uploads/1999/01/pp\\_IST\\_99\\_01.pdf](https://www.fontagro.org/wp-content/uploads/1999/01/pp_IST_99_01.pdf)

- Erazo, V. (2024). *Evaluación de la actividad antifúngica del extracto Etanólico de HELIOTROPIUM INDICUM (cola de alacrán) sobre el fitopatógeno MYCOSPHAERELLA FIJIENSIS*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Burgos, Y. (2019). *Análisis proteómico de la pared celular del hongo Pseudocercospora fijiensis*. Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Muñoz, G. (2018). *Expresión heteróloga de la proteína PfAvr4 de Pseudocercospora fijiensis y análisis de su efecto in planta*. Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Chang T-C, Salvucci A, Crous PW, Stergiopoulos I (2016) Comparative Genomics of the Sigatoka Disease Complex on Banana Suggests a Link between Parallel Evolutionary Changes in *Pseudocercospora fijiensis* and *Pseudocercospora eumusae* and Increased Virulence on the Banana Host. *PLoS Genet* 12(8): e1005904. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005904>
- Arango Isaza RE, Diaz-Trujillo C, Dhillon B, Aerts A, Carlier J, Crane CF, et al. (2016) Combating a Global Threat to a Clonal Crop: Banana Black Sigatoka Pathogen *Pseudocercospora fijiensis* (Synonym *Mycosphaerella fijiensis*) Genomes Reveal Clues for Disease Control. *PLoS Genet* 12(8):e1005876. doi:10.1371/journal.pgen.1005876
- BASF. (2022). Cultivo de banano. <https://agriculture.basf.com/ec/es/proteccion-de-cultivo-y-semillas/cultivos/cultivo-de-banano>
- Riveros, A., & Romero, D. (2005). Evaluación de la resistencia a Sigatoka negra en cultivares transgénicos de plátano bajo condiciones controladas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Rivas, G., & Rosales, F. E. (2003). Sigatoka negra del banano y plátano: Estrategias de manejo. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 66, 62–75.

- Calvo, C., & Bolaños, E. (2001). Comparación de tres métodos de deshoja en banano (*Musa AAA*): su efecto sobre el combate de la sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) y sobre la calidad de la fruta. *Revista CORBANA*, 27(54), 1–12.
- Jiménez, C., Rivero, A. S., Pocasangre, L. E., Delgado, E., Rosales, F. E., González, Ó., & Romero, D. (2009). Efecto de la inoculación de dos tipos de semilla de bananos con dos aislados de *Trichoderma atroviride* en fase de vivero sobre el desarrollo de las plantas en campo bajo Sigatoka Negra. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(2), 403–413.
- Mena-Espino, X., & Couoh-Uicab, Y. (2015). Efectos de los plaguicidas utilizados para el control de la Sigatoka negra en plantaciones bananeras en México, así como su efecto en el ambiente y la salud pública. *Tecnociencia Chihuahua*, IX(2), 91–98.
- Ayala, A., Colina, M., Molina, J., Vargas, J., Rincón, D., Medina, J., Rosales, L., & Cárdenas, H. (2014). Evaluación de la actividad antifúngica del quitosano contra el hongo *Mycosphaerella fijiensis* Morelet que produce la Sigatoka negra que ataca el plátano. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 15(6), 312–338.
- Alcívar Campoverde, B. S. (2014). *Evaluación varios fungicidas y un entomopatógeno para el control de sigatoka negra Mycosphaerella fijiensis en banano orgánico.*
- Guzmán, M., & Paladines, R. (2017, 1 febrero). *Black Sigatoka - CropLife Latin America: representamos a la Industria de la ciencia de los cultivos.* Croplifela.org.  
<https://www.croplifela.org/en/diseases/black-sigatoka>
- FAOSTAT. (2022). *Países productores y exportadores de banano.*  
[https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities\\_by\\_country](https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/commodities_by_country)
- Chávez Navarrete, R. (2015). Impacto de la resistencia a fungicidas en *Mycosphaerella fijiensis*.

- Savage, S. (2024). Strategies to Save the Global Banana Industry. Forbes.  
<https://www.forbes.com/sites/stevensavage/2024/04/16/strategies-to-save-the-global-banana-industry/>.
- Gilberto, Manzo-Sánchez et al. (2017). "Mutations in the CYP51 Gene and Their Impact on the Efficacy of Triazole Fungicides in *Mycosphaerella fijiensis*." *Plant Disease*, 87(3), 208-214.
- Ditisa. (2024). *Control químico para el manejo integrado de la Sigatoka negra*.  
[https://ditisa.net/files/5ffdce32a1c08\\_Anexo%204.2-5\\_Control%20Qu%C3%ADmico%20para%20el%20Manejo%20Integrado%20de%20la%20Sigatoka%20negra.pdf](https://ditisa.net/files/5ffdce32a1c08_Anexo%204.2-5_Control%20Qu%C3%ADmico%20para%20el%20Manejo%20Integrado%20de%20la%20Sigatoka%20negra.pdf)
- Segura, A. (2018). *Fisiología de la Producción del Cultivo de Banano en el Trópico*. Intagri.  
<https://www.intagri.com/articulos/frutales/fisiologia-de-la-produccion-del-cultivo-de-banano-en-el-tropico>