



**Somos calidad,
somos USC**

**Avances en el control biológico de *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense en cultivos de
banano: revisión sistemática y perspectivas para su adopción en Colombia**

Autor

Juan Sebastian Vallejo Gonzalez

Microbiólogo

Director

Jonathan Arturo Bautista Carillo

**Facultad de Ciencias Básicas
Microbiología
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2025**

IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado según los siguientes criterios:

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Identificación de agentes microbianos para aplicar biocontrol y disminuir pérdidas por Foc	Productores de banano y plátano y sector agroindustrial colombiano
Responsabilidad social	Sustitución de fungicidas por productos naturales	Agricultores, comunidades bananeras y consumidores
Científico	Sistematización de avances sobre el control biológico del Foc	Comunidad científica, universidades, investigadores y centros de investigación
Indicadores de Gestión	Publicación del estudio y citación científica	Comunidad científica, investigadores y centros de investigación
Tecnológico	Uso de cepas con potencial biotecnológico para desarrollo de bioproductos	Empresas y productores de bioinsumos
Técnico	Sistematización de metodologías de aplicación y condiciones óptimas para MBCA	Investigadores, profesionales, comunidad bananera y técnicos agrícolas
Ambiental	Reducción del uso de agroquímicos y preservación de la microbiota del suelo	Medio ambiente y sector agrícola
Social	Prevención de pérdida de empleos en sector rural	Comunidades rurales, emprendedores y asociaciones campesinas
Cultural	Integración del conocimiento de prácticas agrícolas sostenibles	Medio ambiente, regiones productoras de banano y comunidad científica

AVANCES EN EL CONTROL BIOLÓGICO DE FUSARIUM OXYSPORUM F. SP. CUBENSE EN CULTIVOS DE BANANO: REVISIÓN SISTEMÁTICA Y PERSPECTIVAS PARA SU ADOPCIÓN EN COLOMBIA.

Juan Sebastian Vallejo Gonzalez¹ (juan.vallejo05@usc.edu.co)

Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

El banano es un cultivo esencial para la seguridad alimentaria y economía de Colombia, amenazado por el hongo patógeno *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc), en especial por su raza tropical 4 (TR4). Esta revisión sistemática evaluó los avances en el control biológico de Foc utilizando Agentes Microbianos de Control Biológico (MBCA). Tras una búsqueda en Scopus, ScienceDirect y PubMed bajo lineamientos PRISMA, se seleccionaron 32 estudios. Los resultados identificaron a los géneros *Bacillus*, *Streptomyces* y *Trichoderma* como los más efectivos, mostrando porcentajes de inhibición in vitro entre 60-90% y eficacias de control in vivo de 70-85% mediante mecanismos como antibiosis, competencia e inducción de resistencia sistémica. Aunque la viabilidad de implementación en Colombia se califica como media (3/5) debido a desafíos normativos y económicos, el potencial de implementación es alto dada la compatibilidad climática y los prometedores resultados. Se concluye que el control biológico representa una estrategia sostenible y viable, requiriendo más investigación local para su adopción a gran escala.

Palabras clave: Banano; Biocontrol; *Fusarium oxysporum f. sp. cubense*; Marchitez de Fusarium; MBCA

Advances in the Biological Control of *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* in Banana Crops: Systematic Review and Prospects for Adoption in Colombia

ABSTRACT

Banana is an essential crop for food security and the economy of Colombia, threatened by the pathogenic fungus *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc), especially its tropical race 4 (TR4). This systematic review evaluated advances in the biological control of Foc using Microbial Biological Control Agents (MBCAs). Following a PRISMA-guided search in Scopus, ScienceDirect, and PubMed, 32 studies were selected. The results identified the genera *Bacillus*, *Streptomyces*, and *Trichoderma* as the most effective, showing in vitro inhibition percentages between 60-90% and in vivo control efficacies of 70-85% through mechanisms such as antibiosis, competition, and induced systemic resistance. Although the feasibility of implementation in Colombia is rated as medium (3/5) due to regulatory and economic challenges, the implementation potential is high given the climatic compatibility and promising results. It is concluded that biological control represents a sustainable and viable strategy, requiring further local research for its large-scale adoption.

Keywords: Banana; Biocontrol; *Fusarium oxysporum f. sp. cubense*; *Fusarium wilt*; MBCA

HIGHLIGHTS

-Se identificaron los géneros microbianos *Bacillus* (38%), *Streptomyces* (31%) y *Trichoderma* (16%) como los agentes de control biológico (MBCA) más efectivos contra *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc), mostrando eficacias de control in vivo que oscilan entre 70% y 85%.

-La evaluación de viabilidad para la implementación en Colombia obtuvo una puntuación media (3/5), donde los aspectos ambientales y técnicos son favorables, pero los desafíos normativos y económicos representan las principales barreras para su adopción.

1. INTRODUCCIÓN

El banano es un cultivo de gran importancia tanto en el ámbito nacional como internacional, por ser un alimento básico para millones de personas y representar un producto estratégico en la economía de numerosos países tropicales en desarrollo (FAO, 2022). En Colombia, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2025) reporta que el sector bananero y platanero genera más de 500.000 empleos directos e indirectos y que alrededor de 560 mil familias campesinas se dedican al cultivo en el territorio nacional, por lo que, se constituye en factor clave para la seguridad alimentaria y la economía del país.

Sin embargo, la industria bananera se enfrenta a una amenaza por *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc), un hongo conocido como “Mal de Panamá”, responsable de la marchitez vascular que ocasionó una devastadora epidemia en Panamá a principios del siglo XX, donde diezmó vastas plantaciones cultivadas con la variedad Gros Michel, la cual era dominante en el comercio internacional en esa época (Ploetz, 2015). Debido a su rápida propagación, la industria bananera fue obligada a realizar una transición hacia variedades Cavendish resistentes al Foc raza tropical 1; no obstante, esta fue una solución temporal, ya que el Foc presenta razas que afectan a las diferentes variantes genéticas del banano (Ploetz, 2006).

La marchitez por *Fusarium oxysporum f. sp. Cubense* representa una de las enfermedades más destructivas del banano, con alta capacidad de permanencia en el suelo y difícil erradicación (Pegg et al., 2019), especialmente su variante más agresiva, la Raza Tropical 4 (TR4), detectada oficialmente en Colombia en 2019 en el departamento de La Guajira (García-Bastidas et al., 2019).

El Foc es un patógeno de la división Ascomycota que infecta el sistema vascular de la planta generalmente a través de sus raíces. Posteriormente, el hongo prolifera dentro del xilema, lo cual provoca la obstrucción del paso de nutrientes y agua (Dita et al., 2018), como consecuencia, aparecen los típicos síntomas de marchitez como el amarillamiento de las hojas y el ennegrecimiento en la parte interna del tallo, que finalmente provocan la muerte de la planta (Kema et al., 2021).

Este patógeno es altamente persistente, no tiene tratamiento químico efectivo y puede permanecer viable en el suelo por más de 30 años gracias a estructuras de resistencia como las clamidosporas. Además, su capacidad para dispersarse a través de agua, el suelo, el material vegetal, maquinaria y herramientas infectadas lo convierten en un microorganismo de difícil erradicación (Orr & Nelson, 2018).

La complejidad y peligrosidad del Foc radican en la subdivisión en sus razas. Estas se definen tradicionalmente por la variante genética del banano que son capaces de infectar (Dita et al., 2018). La raza 1 (R1) infecta, en su mayoría, cultivos de la variedad Gros Michel (AAA), la raza 2 (R2) infecta la variante genética Bluggoe (AAB) y la raza 4 tiene la capacidad de infectar todos los tipos de cultivo, incluyendo los Cavendish (AAA), más comunes y comerciales (Su et al., 1986). Además, esta raza 4 la constituyen dos subrazas: la subtropical, que afecta a cultivos Cavendish que estén bajo condiciones de estrés climático; y la tropical (TR4), que actualmente es la mayor amenaza para la industria del banano (Ploetz, 2015).

El control de este microorganismo es complejo, no existen agentes químicos eficaces, sino únicamente medidas de prevención y cuarentena que solo retrasan la propagación, pero no logran erradicar el patógeno de suelos que ya están contaminados (Dita et al., 2018). Estas estrategias, aunque necesarias para contener la diseminación del hongo, resultan insuficientes ante su capacidad de sobrevivir durante décadas en el suelo.

El mejoramiento genético convencional para desarrollar variedades resistentes fue considerado el método más eficaz; sin embargo, con el tiempo y las apariciones de las razas del patógeno, este método se volvió casi obsoleto, pues se trata de un proceso complejo y de largo plazo. Este desafío se ve agravado por la esterilidad de la mayoría de los cultivares comerciales de banano, que están alterados genéticamente, así como por la poliploidía que complica los cruzamientos, y por la lenta aceptación en el mercado internacional de nuevas variedades con características organolépticas o de apariencia diferentes a la variante Cavendish actualmente comercializada (Ortiz & Swennen, 2014). Frente a estas limitaciones, la aplicación de microorganismos benéficos como agentes de control biológico surge como una alternativa sostenible para el manejo del Foc.

Según la evidencia reunida por Bubici et al. (2019), el control biológico emerge como una estrategia sostenible y prometedora que integra diferentes microorganismos que impiden el desarrollo y la proliferación de este hongo patógeno. Estos microorganismos, denominados agentes de control biológico microbianos (MBCA), incluyen hongos, bacterias y actinomicetos, entre los cuales destacan *Trichoderma spp.*, *Bacillus spp.* y *Streptomyces spp.*, que han demostrado un notable potencial en el control biológico de Foc mediante mecanismos biológicos como antibiosis, competencia, parasitismo e inducción de respuesta inmune sistémica en las plantas (Swarupa, 2014).

En el mismo sentido, Thangavelu y Gopi (2015) reportaron altos porcentajes de inhibición del crecimiento micelial in vitro y una reducción significativa de la incidencia de la enfermedad en condiciones de invernadero con cepas de los hongos *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma asperellum*. Por otro lado, Bubici et al. (2019) demostró, mediante la evaluación de bacterias, que cepas de *Pseudomonas fluorescens* y *Pseudomonas aeruginosa* son efectivas en el control de este patógeno a través de la producción de sideróforos y compuestos antifúngicos.

En contraste con la amplia evidencia internacional, en Colombia las investigaciones sobre el control biológico de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* son aún limitadas, aunque en crecimiento. Los estudios más recientes se han centrado en el uso de bacterias como *Pseudomonas spp.* (Vásquez Basto & Hurtado Sandoval, 2023), hongos del género *Trichoderma* (Álvarez Flórez, 2023) y, más recientemente, en micovirus que inducen hipovirulencia en el patógeno (Arango Palacio, 2024). Asimismo, se han explorado cepas de *Bacillus spp.* y *Trichoderma spp.* que utilizan diversos mecanismos biológicos como antibiosis, inducción de respuesta inmune sistémica y competencia, contribuyendo tanto a la supresión del Foc como a la promoción del crecimiento de la planta de banano (Izquierdo-García, 2024).

Ante este panorama, el control biológico se consolida como una estrategia prometedora y sostenible para el manejo de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* (Foc). No obstante, resulta necesario sistematizar la evidencia científica disponible acerca del uso de agentes microbianos de control biológico (MBCAs) frente a este patógeno. Si bien se han desarrollado numerosos estudios internacionales sobre el tema, aún se desconocen de manera integral los avances alcanzados en el control biológico del Foc que permitan evaluar su implementación en cultivos de banano bajo las condiciones de Colombia. Por lo tanto, esta revisión sistemática busca organizar, analizar y comparar la información científica disponible sobre MBCAs empleados contra el Foc, con el propósito de: (I) identificar los agentes microbianos de control biológico más relevantes y sus mecanismos de acción; (II) comparar su eficiencia frente al Foc; y (III) evaluar su aplicabilidad en el contexto colombiano, considerando factores ambientales, técnicos y regulatorios.

2. METODOLOGÍA

2.1. Estrategia de búsqueda

Se realizó esta revisión siguiendo los lineamientos de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). La búsqueda de literatura se llevó a cabo en las bases de datos ScienceDirect, PubMed y Scopus, esta búsqueda fue guiada por la pregunta de investigación: "¿Cuáles son los avances del control biológico utilizando Agentes Microbianos de Control biológico (MBCA) sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense (Foc) en cultivos de banano que permiten evaluar su implementación en Colombia?".

Se incluyeron únicamente artículos de investigación publicados entre el año 2015 y 2025 que se enfocaron en el biocontrol de Foc en cultivos de banano mediante el uso de microorganismos. Se utilizaron términos clave como "*Fusarium oxysporum* f. sp. cubense" y "banana" en todas las bases de datos.

La estrategia de búsqueda se refinó empleando operadores booleanos, lo que resultó en los siguientes algoritmos de búsqueda específicos para cada base:

- en Scopus se utilizó el algoritmo de búsqueda "TITLE (fusarium AND oxysporum AND f. AND sp. AND cubense AND banana OR wilt) AND (Bacillus OR Streptomyces OR Trichoderma OR Pseudomonas OR Actinomycetes)",
- En PUBMED se utilizó el algoritmo "fusarium AND oxysporum AND f. AND sp. AND cubense AND (banana OR wilt AND Bacillus OR Streptomyces OR Trichoderma OR Pseudomonas OR Actinomycetes)"
- y en ScienceDirect se utilizó la búsqueda avanzada con el algoritmo " ("Fusarium oxysporum f. sp. cubense") AND (Bacillus OR Streptomyces OR Trichoderma OR Pseudomonas) AND (banana)"

2.2 Cribado y selección de estudios

Se utilizó la herramienta Rayyan para la selección de estudios. Las bibliografías de los artículos resultantes de la búsqueda en Scopus y Science Direct se exportaron en formato RIS, el cual fue importado a Rayyan para su posterior selección. Para PubMed, se generó un archivo de formato txt. Rayyan ofreció una breve interfaz a través de la cual se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión para seleccionar y excluir estudios:

Criterios de inclusión:

- (1) Artículos de investigación originales.
- (2) Estudios que incluyan microorganismos MBCA como control.
- (3) Artículos publicados entre 2015 y 2025.
- (4) Estudios que no evalúen biocontrol sobre Foc
- (5) Estudios con trabajo experimental sobre MBCA en banano.

Criterios de exclusión:

- (1) Estudios que empleen exclusivamente análisis genómicos, metagenómicos o in silico.
- (2) Estudios en cultivos diferentes al banano o que no lo incluyan
- (3) Hongos patógenos diferentes a *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense.
- (4) Artículos que no estén en idioma inglés o español.
- (5) Control de Foc que no utilice MBCA.

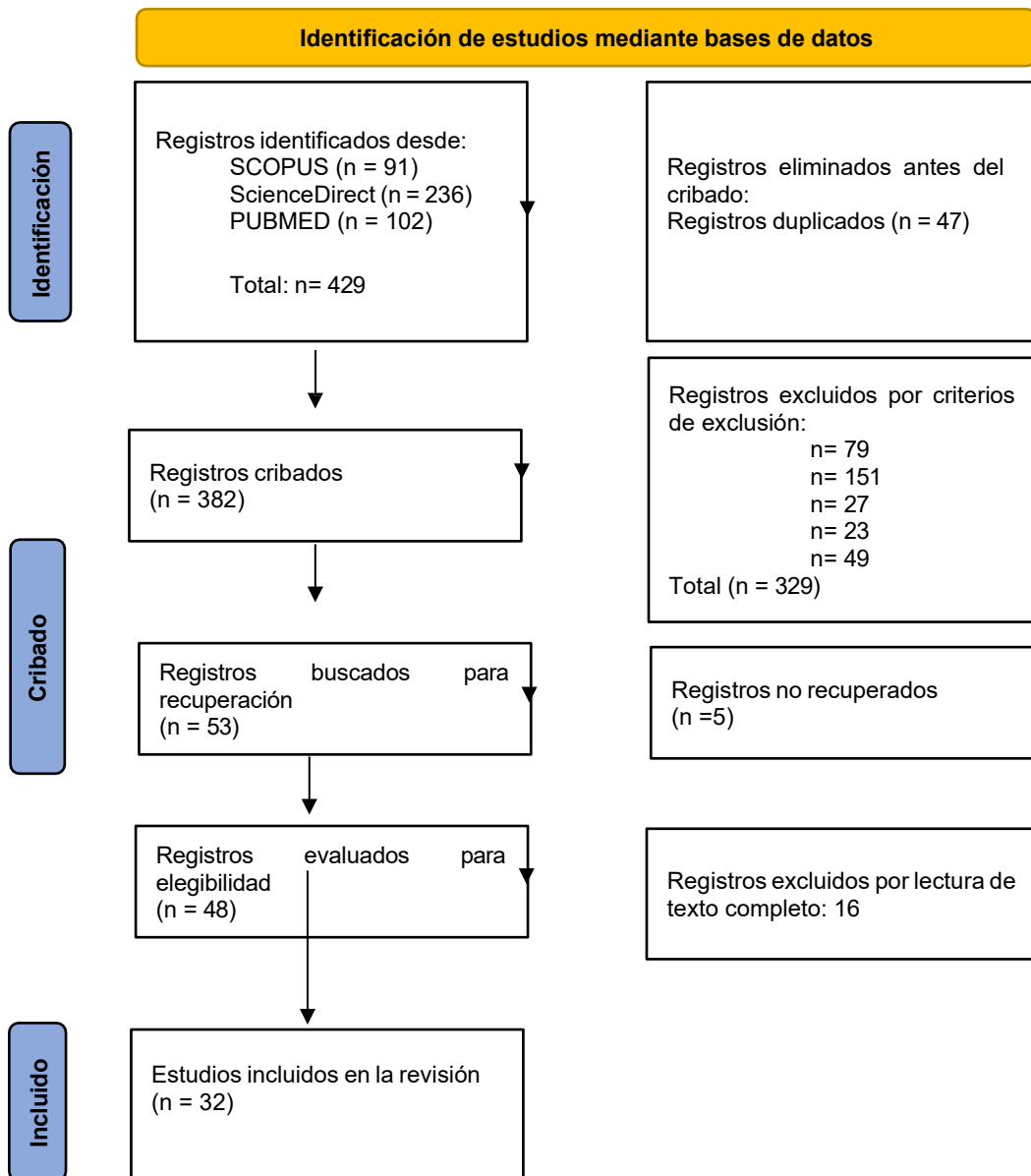
Se examinaron todos los artículos por título y resumen para aplicar los criterios y así extraer los estudios que fueron utilizados para la revisión mediante la lectura del texto completo.

Tras desarrollar los procesos de identificación y cribado (ver el diagrama de flujo PRISMA), se obtuvieron los siguientes resultados:

(I) Se identificaron 429 títulos relacionados con el tema de estudio, de los cuales 91 procedían de la base de datos Scopus, 236 de ScienceDirect y 102 de PubMed. Entre ellos, se eliminaron 47 registros duplicados, resultando 382 estudios para cribado inicial.

(II) Durante esta fase, se excluyeron 79 artículos por abarcar exclusivamente análisis genómicos, metagenómicos o in silico; 151 por no evaluar el biocontrol sobre a *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* (Foc); 27 por estar relacionados a cultivos distintos al banano; 23 por estudiar hongos patógenos distintos al Foc; y 49 por no usar MBCA para el control de Foc. De las 53 publicaciones obtenidas, 5 no pudieron ser recuperadas.

(III) Entre los 48 textos elegibles, se eliminaron 16 después de la lectura completa, de modo que finalmente se incluyeron 32 artículos en la revisión sistemática del presente estudio.



Extracción y análisis de datos

Una vez seleccionados los artículos elegibles, se procedió a la sistematización de la información mediante la tabulación de los datos en una matriz de extracción. Esta matriz permitió organizar los resultados de los estudios y generar distintas tablas de síntesis (Tabas 1-6) y figuras (Figura 2-7), elaboradas según las variables de comparación y análisis definidas en función de los objetivos de la revisión.

Se elaboró una primera tabla con la información genérica de los artículos. En primer lugar, se consideró el año de publicación, para ver tendencias temporales en los estudios. En segundo lugar, se incluyó el título del artículo, para la fácil identificación de su contenido. En tercer lugar, se registró el país, lo cual se consideró útil para ver tendencias de publicación regional y para la evaluación de aplicabilidad en Colombia. Finalmente, se incluyó el microorganismo utilizado para el control biológico del Foc, para comparación entre especies y su eficacia utilizando variables de otras matrices de síntesis.

Además, se consideraron en las tablas variables como la raza de Foc, para evaluar relevancia de las investigaciones, se describieron y compararon cada microorganismo con el fin de identificar aquellos con mayor potencial en el control biológico. Para ello se tuvieron en cuenta variables como la cantidad utilizada en peso o volumen, el mecanismo de acción que utilizó el microorganismo y los resultados de los estudios más relevantes reportados en los estudios (tabla 2 y 3).

Se tuvieron en cuenta variables como la medida de efectividad, con el fin de priorizar los organismos que presentaron una mayor efectividad para evaluar su aplicabilidad en el control biológico de Foc utilizando MBCA (Tabla 4). En la evaluación se analizó la variedad del cultivo de banano para juzgar la relevancia en la aplicabilidad en el contexto colombiano. También se analizó el origen del MBCA, para determinar la viabilidad de su uso en Colombia y el método de aplicación para evaluar si representaba una alternativa sostenible. Además, se consideraron las condiciones ambientales y la duración del ensayo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Distribución temporal y geográfica de los artículos de investigación

La selección de los 32 artículos afines al objetivo de la investigación, relacionados al control biológico de *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc) en banano. Permiten describir tendencias asociadas a periodos de investigación, países interesados y microorganismos estudiados.

Tabla 1. Matriz de extracción de datos

No.	Autores	Año	Título del artículo	País	MBCA
1	(Wei et al., 2020)	2020	A newly isolated <i>Streptomyces</i> sp. YYS-7 with a broad-spectrum antifungal activity improves the banana plant resistance to <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. cubense tropical race 4.	CHINA	<i>Streptomyces</i> sp. YYS-7
2	Zhang et al. (2023)	2023	A newly isolated <i>Trichoderma parareesei</i> N4-3 exhibiting a biocontrol potential for banana fusarium wilt by hyperparasitism	CHINA	<i>Trichoderma Parareesei</i> N4-3
3	(Singh et al., 2021)	2021	A Thermotolerant Marine <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> S185 Producing Iturin A5 for Antifungal Activity against <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. cubense	CHINA	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> S185
4	(Jegan et al., 2025)	2025	Antifungal and plant-growth promoting potency of <i>Streptomyces rochei</i> against	INDIA	<i>Streptomyces rochei</i>

		biotic stress caused by Race 4 Fusarium wilt on banana			
5	(Wang et al., 2023)	2023	Antifungal effects and biocontrol potential of lipopeptide-producing <i>Streptomyces</i> against banana Fusarium wilt fungus <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>Cubense</i>	CHINA	<i>Streptomyces</i> sp. XY006
6	(Wan Tajudin Shah et al., 2025)	2025	Antifungal potential of <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> AM2 against banana pathogen <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> Tropical Race 4	MALASIA	<i>B. velezensis</i> B4158, <i>B. atrophaeus</i> B363B, <i>B. amyloliquefaciens</i> B942, <i>S. morookaensis</i> B12429, <i>y L. plantarum</i> AM2
7	(WANG et al., 2016)	2016	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Strain W19 can Promote Growth and Yield and Suppress Fusarium Wilt in Banana Under Greenhouse and Field Conditions	CHINA	<i>B. amyloliquefaciens</i> W19
8	(Yu et al., 2025)	2025	<i>Bacillus velezensis</i> YN2111 reveals the potential role of amine oxidase in Fusarium wilt response in Cavendish bananas	CHINA	<i>Bacillus velezensis</i> YN2111
9	(Fan et al., 2023)	2023	Banana disease-suppressive soil drives <i>Bacillus</i> assembled to defense Fusarium wilt of banana	CHINA	<i>Bacillus velezensis</i> YN1910
10	(Du et al., 2024)	2024	Biocontrol Agents Inhibit Banana Fusarium Wilt and Alter the Rooted Soil Bacterial Community in the Field	CHINA	<i>Paenibacillus terrae</i> , <i>Burkholderia cepacia</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> <i>y Paenibacillus polymyxa</i>
11	(Zhang et al., 2022)	2022	Biocontrol Potential of Endophytic <i>Streptomyces malaysiensis</i> 8ZJF-21 From Medicinal Plant Against Banana Fusarium Wilt Caused by <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> Tropical Race 4	CHINA	<i>Streptomyces malaysiensis</i> 8ZJF-21
12	(Saravanan et al., 2022)	2022	Biohardening of Banana cv. Karpooravalli (ABB; Pisang Awak) With <i>Bacillus velezensis</i> YEBBR6 Promotes Plant Growth and Reprograms the Innate Immune Response Against <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>cubense</i>	INDIA	<i>Bacillus velezensis</i> YEBBR6
13	(Li et al., 2021)	2021	Biological control of banana wilt disease caused by <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>Cubense</i> using <i>Streptomyces</i> sp. H4	CHINA	<i>Streptomyces</i> sp. H4
14	(Wang et al., 2022)	2022	Biological Control of <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> Tropical Race 4 in Banana Plantlets Using Newly Isolated <i>Streptomyces</i> sp. WHL7 from Marine Soft Coral	CHINA	<i>Streptomyces</i> sp. WHL7
15	(Fan et al., 2021)	2021	Biological control of <i>Fusarium oxysporum</i> f. Sp. <i>cubense</i> tropical race 4 using natively isolated <i>Bacillus</i> spp	CHINA	<i>Bacillus</i> spp. YN0904 <i>y YN1419</i>

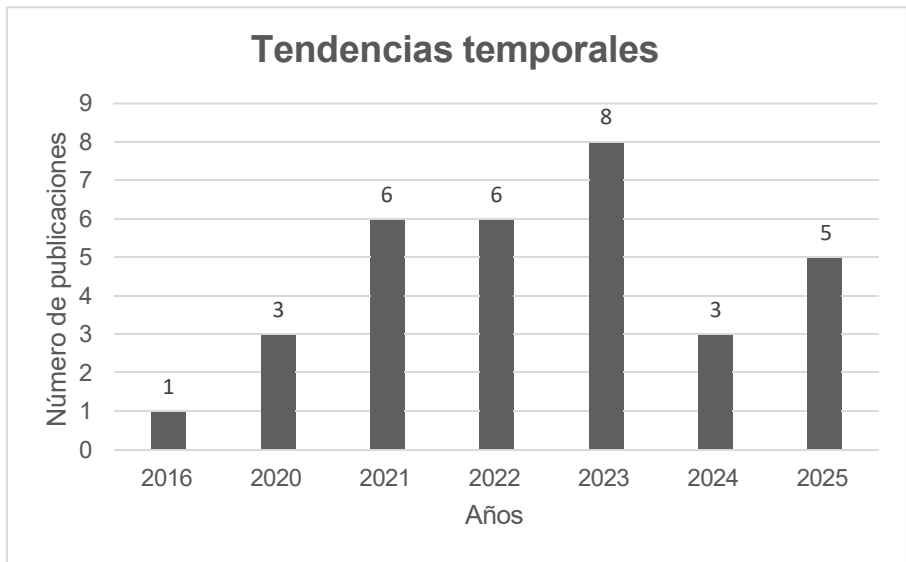
16	(Damodaran et al., 2020)	2020	Biological Management of Banana Fusarium Wilt Caused by Fusarium oxysporum f. sp. cubense Tropical Race 4 Using Antagonistic Fungal Isolate CSR-T-3 (<i>Trichoderma reesei</i>)	INDIA	<i>Trichoderma reesei</i> CSR-T-3
17	(Sun et al., 2022)	2022	Endophytic <i>Bacillus subtilis</i> TR21 Improves Banana Plant Resistance to Fusarium oxysporum f. sp. cubense and Promotes Root Growth by Upregulating the Jasmonate and Brassinosteroid Biosynthesis Pathways	CHINA	<i>Bacillus subtilis</i> TR21
18	(Xiang et al., 2023)	2023	Bio-priming of banana tissue culture plantlets with endophytic <i>Bacillus velezensis</i> EB1 to improve Fusarium wilt resistance	CHINA	<i>Bacillus velezensis</i> EB1
19	(Kawicha et al., 2023)	2023	Evaluation of Soil <i>Streptomyces</i> spp. for the Biological Control of Fusarium Wilt Disease and Growth Promotion in Tomato and Banana	TAILANDIA	<i>Streptomyces</i> spp.
20	(Da Silva Vieira et al., 2020)	2020	Fusarium oxysporum f. sp. cubense biocontrol mediated by <i>Bacillus</i> spp. In Prata-Anã banana	BRASIL	<i>Bacillus</i> spp.
21	(Liu et al., 2024)	2024	Integrated control of Fusarium wilt in banana by <i>Bacillus velezensis</i> EB1 and potassium sorbate	CHINA	<i>Bacillus velezensis</i> EB1
22	(Zhang et al., 2021)	2021	Isolation and Evaluation of Rhizosphere Actinomycetes With Potential Application for Biocontrolling Fusarium Wilt of Banana Caused by Fusarium oxysporum f. sp. cubense Tropical Race 4	CHINA	<i>Streptomyces</i> BITDG-11
23	(Izquierdo-García et al., 2024)	2024	Microbial-Based Biofungicides Mitigate the Damage Caused by Fusarium oxysporum f. sp. cubense Race 1 and Improve the Physiological Performance in Banana	COLOMBIA	<i>Trichoderma</i> spp. y <i>Bacillus</i> spp.
24	(He et al., 2021)	2021	Monitoring Tritrophic Biocontrol Interactions Between <i>Bacillus</i> spp., Fusarium oxysporum f. sp. cubense, Tropical Race 4, and Banana Plants in vivo Based on Fluorescent Transformation System	CHINA	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus velezensis</i> , y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>
25	(Yun et al., 2022)	2022	Potential Biological Control of Endophytic <i>Streptomyces</i> sp. 5-4 Against Fusarium Wilt of Banana Caused by Fusarium oxysporum f. sp. cubense Tropical Race 4	CHINA	<i>Streptomyces</i> sp. 5-4
26	(Xie et al., 2023)	2023	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain 91: A Multifaceted Biocontrol Agent against Banana Fusarium Wilt	CHINA	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> 91
27	(Zhang et al., 2022)	2022	Rapid and mass production of biopesticide <i>Trichoderma</i> Brev T069 from cassava peels using newly established	CHINA	<i>Trichoderma</i> Brev T069

			solid-state fermentation bioreactor system		
28	(Cabanás et al., 2021)	2021	The banana root endophytome: Differences between mother plants and suckers and evaluation of selected bacteria to control fusarium oxysporum f.sp. cubense	ESPAÑA	<i>Pseudomonas spp.</i>
29	(Xiao et al., 2025)	2025	The discovery of marine natural product Streptochlorin and its inhibition of Banana fusarium wilt by targeting the GPI pathway	CHINA	<i>Streptomyces CH06</i>
30	(Luo et al., 2023)	2023	<i>Trichoderma koningiopsis</i> Tk905: an efficient biocontrol, induced resistance agent against banana Fusarium wilt disease and a potential plant-growth-promoting fungus	CHINA	<i>Trichoderma koningiopsis Tk905</i>
31	(Cui et al., 2025)	2025	<i>Trichoderma virens</i> XZ11-1 producing siderophores inhibits the infection of <i>Fusarium oxysporum</i> and promotes plant growth in banana plants	CHINA	<i>Trichoderma virens XZ11-1</i>
32	(Tian et al., 2023)	2023	A biological product of <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> QST713 strain for promoting banana plant growth and modifying rhizosphere soil microbial diversity and community composition	CHINA	<i>Bacillus amyloliquefaciens QST713</i>

Fuente: Elaboración propia

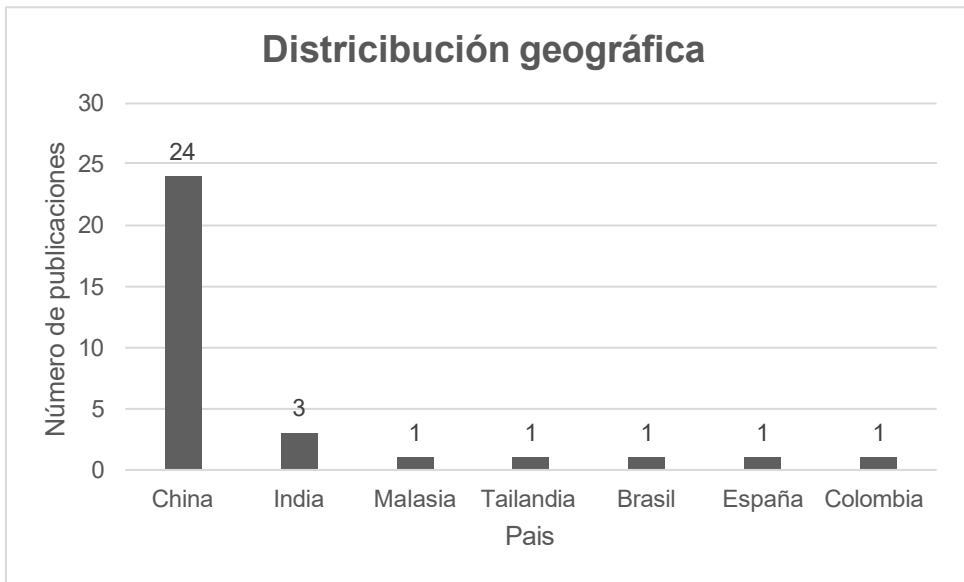
La figura 2 valida el rango de tiempo seleccionado para este estudio, mostrando un incremento de publicaciones a partir del año 2020, situación que podría asociarse con el desarrollo del ataque del espécimen TR4 en Asia y su aparición en América Latina. Esta tendencia coincide con el aumento en la investigación sobre estrategias de manejo sostenible ante la limitada eficacia de los fungicidas químicos y la rápida dispersión del Foc TR4 (Dita et al., 2018).

Figura 2. Tendencia temporal de investigaciones



Con respecto a la distribución geográfica de los estudios seleccionados, se revela la importancia del país asiático, China, respecto a las demás regiones consultadas India, Malasia, Tailandia, Brasil, España y Colombia. El gran porcentaje de investigaciones chinas puede atribuirse a que este país es el mayor productor mundial de banano y enfrenta graves problemas con Foc TR4 desde hace más de dos décadas, lo que ha impulsado fuertes programas de investigación en biocontrol (ZHANG et al., 2024). Contrario a lo presentado en América Latina, más específicamente en Colombia donde se destaca el estudio de Izquierdo et al., 2024, con la aplicación de agentes biocontroladores agrupando especies *Trichoderma* y *Bacillus*.

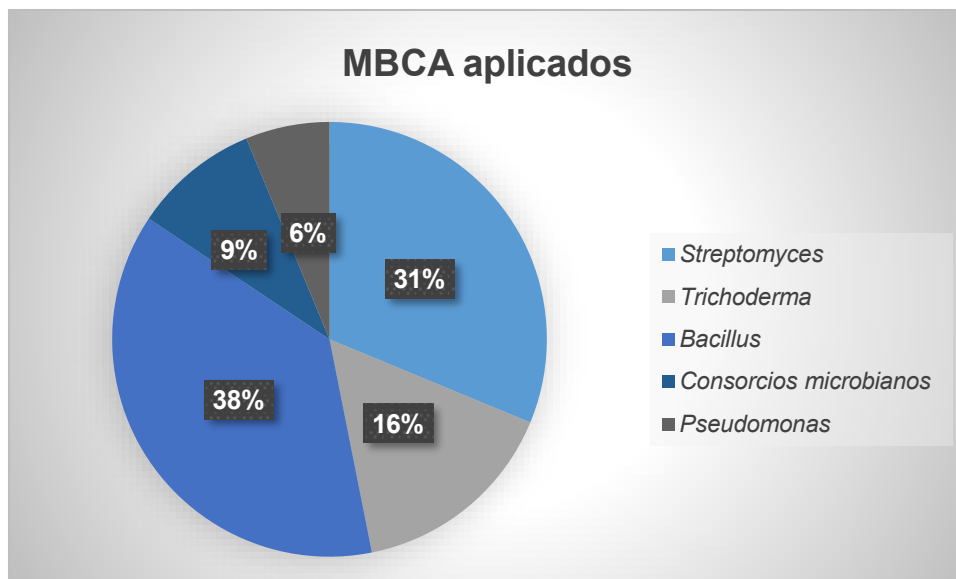
Figura 3. Ubicación de publicaciones



Por parte de los distintos agentes microbianos estudiados, los géneros *Bacillus* 38% y *Streptomyces* 31%, se destacan como principales actores destinados a combatir el patógeno TR4, seguido por los grupos de especies de *Trichoderma* 16% y por los consorcios microbianos 9%, por último, se encuentran especies de *Pseudomonas* 6% como las más utilizadas. El porcentaje del género *Bacillus* concuerda con revisiones globales sobre biocontrol

de fitopatógenos, donde bacterias de estas especies son frecuentemente reportadas por su versatilidad metabólica y capacidad de formar esporas resistentes (Bubici et al., 2019).

Figura 4. Agentes microbiológicos investigados



Fuente: Elaboración propia

3.2. Eficacia y mecanismos de acción de los principales agentes de Biocontrol

Como resultado de la interpretación y evaluación, se identificaron los agentes microbianos con mejor desempeño en el control de *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc), estos se sintetizaron en la Tabla 2, donde se encuentran los resultados obtenidos en los estudios revisados, comparando las características más relevantes de cada ensayo con MBCA, como la cantidad utilizada, el mecanismo de acción reportado, los porcentajes de inhibición alcanzados y la raza de Foc evaluada. Esta compilación permitió establecer una visión comparativa de la eficacia de los microorganismos estudiados y su potencial aplicación en Colombia, donde la amenaza del Foc TR4 continúa en expansión (García-Bastidas et al., 2019; Izquierdo-García et al., 2024).

Tabla 2. Matriz de síntesis de MBCA

MBCA	Cantidad utilizada	Mecanismo de acción	Resultados	Raza de Foc
Streptomyces YYS-7	sp. In vivo: 1.0×10^6 UFC/g de suelo. In vitro: No reporta	Antibiosis	In vitro: Inhibición del crecimiento micelial de Foc TR4 en un 69.91% por la cepa. In vivo: Sin clorosis visible, más altura y tallos más gruesos	TR4
<i>Trichoderma Parareesei</i> N4-3	In vivo: 1.0×10^7 UFC/mL. In vitro: No reporta	Hiperparasitismo	In vitro: Inhibición del crecimiento de 72.37 In vivo: reducción de índice de enfermedad en un 72%.	TR4

<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> S185	In vivo: 2.0 x 10 ⁵ células/mL In vitro: No reporta	Antibiosis		In vitro: inhibición visible In vivo: reducción visible de síntomas de marchitez	No reporta
<i>Streptomyces rochei</i>	In vitro: No reporta In vivo: 10 ml	Antibiosis competencia	y	In vitro: 65.88% de inhibición de crecimiento. In vivo: Mayor altura, de 12,48 cm a 32,76 cm; mayor índice de estabilidad de clorofila (57,03% contra 84,21%) y reducción total de síntomas de marchitez.	TR4
<i>Streptomyces XY006</i>	<i>sp.</i> In vivo: 10 ⁶ UFC/mL In vitro: No reporta	Antibiosis		In vitro: inhibición de 47,5%, disminución en la producción de esporas en 66,5%. In vivo: aumento de clorofila, nitrógeno y tallos más altos. Con eficacia de biocontrol de 87,7%	TR4
<i>B. velezensis</i> B4158, <i>B. atrophaeus</i> B363B, <i>B. amyloliquefaciens</i> B942, <i>S. morookaensis</i> B12429, y <i>L. plantarum</i> AM2	In vitro: No reporta In vivo: 30 mL	Antibiosis inducción respuesta sistémica	e de inmune	In vitro: porcentaje de inhibición obtenidos <i>B. velezensis</i> B4158: 36,56% <i>B. atrophaeus</i> B363B: 38,55% <i>B. amyloliquefaciens</i> B942: 36,22% <i>S. morookaensis</i> B12429: 31% <i>L. plantarum</i> AM2: 42,13% In vivo: todas las plántulas presentaron reducción de síntomas de la enfermedad, siendo <i>L. plantarum</i> AM2 el MBCA que causó la mayor reducción del índice de enfermedad	TR4
<i>B. amyloliquefaciens</i> W19	In vivo: En maceta: 10 ⁶ UFC/g En campo: No reporta In vitro: 0,5 mL.	Formación de biofilms y antibiosis		In vivo: Experimento en maceta: aumento en el tamaño de la planta y diámetro del pseudotallo Experimento en campo: aumento de tamaño en las plantas, aumento de diámetro del pseudotallo, disminución de incidencia de la enfermedad y aumento de peso por planta. In vitro: Inhibición de crecimiento del Foc	No reporta
<i>Bacillus velezensis</i> YN2111	In vitro: No reporta In vivo: No reporta	In vitro: antibiosis e inducción de respuesta sistémica		In vitro: Inhibición de 70,69% In vivo: Incremento en la incidencia de la enfermedad, permite que la planta se infecte más rápido	TR4

<i>Bacillus velezensis</i> YN1910	In vitro: No reporta In vivo: 40 mL con 1×10^8 UFC/mL y 1×10^7 UFC/mL	Antibiosis y competición	In vitro: porcentaje de inhibición de 81,78% In vivo: reducción de síntomas de la enfermedad, hojas y porcentaje de biocontrol de 81,67% y 79,17%.	TR4
<i>Paenibacillus terrae</i> , <i>Burkholderia cepacia</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Paenibacillus polymyxa</i>	In vivo: Agente microbiano compuesto por todos los MBCA: 62,5 L/ha Trichoderma harzianum: 625 kg/ha Paenibacillus polymyxa: 12,5 L/ha	Modificación de la comunidad bacteriana en la rizosfera.	In vivo: Reducción de incidencia de la enfermedad, por el agente microbiano compuesto y <i>Paenibacillus polymyxa</i> fue de 16.67% y 27.78% respectivamente.	No reporta
<i>Streptomyces malaysiensis</i> 8ZJF-21	In vitro: No reporta In vivo: 100 mL	Inducción de respuesta inmune sistémica, antibiosis y competencia.	In vitro: porcentaje de inhibición de 44,88% In vivo: reducción de incidencia de la enfermedad de 65,37% a 18,97%, reducción de síntomas como aumento de clorofila y desaparición de marchitez.	TR4
<i>Bacillus velezensis</i> YEBBR6	In vitro: No reporta In vivo: No reporta	Formación de biofilms, inducción de respuesta inmune sistémica e hiperparasitismo	In vitro: 63% de inhibición In vivo: Incremento de pseudotallo, área de hoja, incremento de clorofila y porcentaje de biocontrol del 100%	TR4
<i>Streptomyces sp.</i> H4	In vitro: No reporta In vivo: caldo de fermentación 1×10^6 UFC/g de suelo	Antibiosis	In vitro: 67,67% de inhibición In vivo: reducción de incidencia de enfermedad, 77,5% a 20%	TR4
<i>Streptomyces sp.</i> WHL7	In vitro: No reporta In vivo: caldo de fermentación 1×10^6 UFC/g de suelo	Inducción de respuesta inmune y antibiosis	In vitro: 69,10% de inhibición In vivo: sin síntomas visibles de la enfermedad, aumento de tamaño, área de hojas e incidencia de enfermedad de hasta 0%	TR4
<i>Bacillus spp.</i> YN0904 y YN1419	In vitro: No reporta In vivo: caldo de fermentación 1×10^7 UFC/mL	Antibiosis	In vitro: porcentaje de inhibición YN0904: 79,6% YN1419: 81,3% In vivo: porcentaje de control YN0904: 74,26% YN1419: 85,61%	TR4
<i>Trichoderma reesei</i> CSR-T-3	In vitro: No reports In vivo: sin especificar In vivo (plantación): 500ml/planta	Antibiosis, mycoparasitismo e inducción de respuesta inmune sistémica	In vitro: 62,65% de inhibición In vivo: reducción de síntomas de la enfermedad In vivo (plantación): reducción de incidencia de enfermedad, 46,50% a 10,58%	TR4

<i>Bacillus subtilis</i> TR21	In vivo: 10 ⁷ y 10 ⁸ UFC/mL	Inducción respuesta sistémica	de inmune	In vivo: reducción de la tasa de incidencia de Foc y producción de más raíces secundarias	TR4 y TR1
<i>Bacillus velezensis</i> EB1	In vitro: No reporta In vivo: 0,1 mL 10 ⁶ UFC/mL	Antibiosis inducción respuesta sistémica	e de inmune	In vitro: 75,43% de inhibición In vivo: Aumento de biomasa, sin síntomas visibles de la enfermedad	TR4
<i>Streptomyces spp.</i>	In vitro: No reporta In vivo: 30 mL	Antibiosis		In vitro: porcentaje de inhibición desde 41% hasta 100% In vivo: porcentaje de control de 71,9 y 78,1	TR1
<i>Bacillus spp.</i>	In vivo: 10 ⁷ UFC/mL	Antibiosis, inducción de respuesta sistémica y competencia	de	In vivo: Reducción de síntomas de la enfermedad	TR1
<i>Bacillus velezensis</i> EB1	In vivo: 50 mL In vitro: No reporta	Antibiosis		In vivo: aumento de tamaño y peso de la planta y reducción de síntomas visibles de la enfermedad In vitro: 68,11% de inhibición	TR4
<i>Streptomyces</i> BITDG-11	In vitro: No reporta In vivo: 10 ⁶ UFC/g suelo	Inducción respuesta sistémica antibiosis	de inmune y	In vitro: 80,48% de inhibición In vivo: Redujo el índice de la enfermedad a menos de 1% y la planta no presentó síntomas de la enfermedad	TR4
<i>Trichoderma spp.</i> y <i>Bacillus spp.</i>	In vivo: suspensión de 1 × 10 ⁶ conidia/mL y 1 × 10 ⁷ células/mL In vitro: 10 µL de suspensión	Inducción respuesta sistémica, antibiosis y competencia	de inmune	In vitro: desde 78,2% a 85,1% de inhibición In vivo: reducción de síntomas de la enfermedad y promoción del crecimiento de la planta	TR1
<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus velezensis</i> , y <i>Bacillus</i> <i>amyloliquefaciens</i>	In vivo: suspensión con 1 × 10 ⁶ UFC/ mL In vitro: No reporta	Producción biofilms	de	In vitro: crecimiento de Foc inhibido In vivo: colonización del xylema de la planta y actividad quimiotáctica	TR4
<i>Streptomyces sp.</i> 5- 4	In vitro: No reporta In vivo: suspensión con 1 × 10 ⁶ UFC/ mL	Antibiosis		In vitro: 83,18% de inhibición para el TR4 y 78,66% para el TR1 In vivo: 71,36% porcentaje de biocontrol	TR4 y TR1
<i>Pseudomonas</i> <i>aeruginosa</i> 91	In vitro: No reporta In vivo: 500 µL suspensión bacteriana ~2.0 × 10 ⁵ UFC/mL	Antibiosis		In vitro: 69% de inhibición In vivo: El MBCA coloniza todos los tejidos de la planta	No reporta
<i>Trichoderma Brev</i> T069	In vivo: 10 ⁷ esporas/g	Antibiosis		In vivo: 64,65% de biocontrol	TR4
<i>Pseudomonas spp.</i>	In vitro: 10 µL In vivo: 150 mL	No reporta		In vitro: inhibición de crecimiento	TR4

			In vivo: reducción de síntomas de marchitez comparado con control	
<i>Streptomyces CH06</i>	In vitro: No reporta In vivo: 168.75 g/ha	Antibiosis	In vitro: zona de inhibición de 4,49 mm In vivo: porcentaje de control de 82,5% en las hojas y 86,5% en el bulbo	TR4
<i>Trichoderma koningiopsis Tk905</i>	In vitro: 1 disco de micelio In vivo: 8 mL	Inducción de respuesta inmune sistémica	In vitro: porcentaje de inhibición mayor a 70% In vivo: 43,53% de control	TR4
<i>Trichoderma virens XZ11-1</i>	In vitro: 1 disco de micelio In vivo: 1×10^5 UFC/g suelo	Hiperparasitismo y antibiosis	In vitro: 63,21% de inhibición In vivo: 60,98% de biocontrol	TR4
<i>Bacillus amyloliquefaciens QST713</i>	In vivo: 100 mL	No reporta	In vivo: índice de enfermedad de 55,20%, control 54,17%	TR4

Los estudios analizados incluyeron tanto evaluaciones *in vitro*, en su mayoría enfocadas en medir la inhibición del crecimiento del hongo, como ensayos *in vivo* que se basaban en gran parte en medir la incidencia de la enfermedad y la visualización de los síntomas de marchitez. En general, los resultados mostraron que los porcentajes de inhibición *in vitro* fueron ligeramente superiores a los reportados *in vivo* como es observado en el estudio de Cui et al. (2025). De manera similar, *Bacillus velezensis* YN1910 presentó un 81,78 % de inhibición *in vitro* y un control del 79,17 % *in vivo* (Fan et al., 2023), lo cual se puede atribuir a las condiciones controladas del laboratorio que favorecen la acción directa de los metabolitos antifúngicos, mientras que en condiciones reales influyen variables edáficas y climáticas que afectan la eficacia del biocontrol (Dita et al., 2018).

En cuanto a los mecanismos de acción observados, la antibiosis fue el más frecuente, presente en la mayoría de cepas de *Bacillus* y *Streptomyces*, a través de la producción de lipopeptidos antifúngicos (iturina, fengicina y surfactina) y metabolitos secundarios como poliquétidos y actinomicinas. Los géneros de *Trichoderma* destacaron por utilizar mecanismos como el micoparasitismo, competencia y la inducción de resistencia sistémica, la cual fortalece las defensas de la planta.

El grupo más eficiente y con mayores estudios reportados es *Bacillus spp.* Con inhibiciones *in vivo* en rangos del 79-81% e *in vitro* superiores al 80% en cepas *Bacillus velezensis* YN1910 y *B. velezensis* EB1. Propiedades como la inducción de resistencia en la planta. A su vez, es compatible con otro tipo de asociaciones MBCA, por su estabilidad ambiental ocasionando un beneficio para la composición de consorcios microbianos (Liu et al., 2024).

En ensayos *in vitro* el grupo *Streptomyces spp.* Presentó similar rendimiento con algunos ensayos *in vitro* cercano a tasas de inhibición del 90%. Su funcionamiento compete a la afectación de la pared celular del hongo por medio de glucanasas y quitinasas, además de la formación de poliquétidos y actinomicinas por la elaboración de metabolitos secundarios. Dependiendo del sustrato y tipo de suelo se tienen buenos resultados por la experimentación *in vivo* (Qi et al., 2022).

La promoción del crecimiento vegetal, la colonización de la rizosfera y disminución del patógeno son consideraciones propias del género *Trichoderma spp.* en ensayos *in vivo*. En consideración su efectividad en ensayos *in vitro* disminuyó ligeramente respecto a *Streptomyces* y *Bacillus*, demostró gran desarrollo en climas tropicales, Se reportaron eficiencias del 65-80% en cepas *T. asperellum* y *T. harzianum* (Rahman et al., 2021).

Las *Pseudomonas* como los consorcios microbianos mostraron gran adaptación, aunque ligeramente menores, demostrando capacidad de asociación en conjunto con la producción de enzimas degradadoras, antibióticos y sideróforos (Lv et al., 2023).

Los géneros más representativos en los porcentajes de control abarcan las especies *Bacillus*, *Streptomyces* y *Trichoderma* considerando los tipos de ensayo (tabla 3)

Tabla 3. Síntesis características MBCA

MBCA	Rango de eficacia reportado	Mecanismo predominante	Observaciones
Bacillus spp. (<i>velezensis</i> , <i>amyloliquefaciens</i> , <i>subtilis</i>)	70–90% inhibición in vitro; 70–85% control in vivo	Antibiosis Inducción resistencia	+ de La capacidad de colonización y equilibrio caracterizan las cepas de <i>B. velezensis</i> . Complementario a la producción de lipopeptidos antifúngicos como surfactina, fengicina e iturina.
Streptomyces spp. (<i>YYS-7</i> , <i>BS-112</i> , <i>K61</i> , <i>YYS-58</i>)	65–90% in vitro; 70–80% in vivo	Antibiosis Competencia	+ La raza TR4 es controlada por el elevado desarrollo de enzimas líticas, poliquetidos y actinomicinas, metabolitos secundarios.
Trichoderma spp. (<i>harzianum</i> , <i>asperellum</i> , <i>viride</i>)	60–85% in vitro; 65–80% in vivo	Micoparasitismo Competencia Inducción	+ + Actúa con gran desempeño en climas tropicales, beneficia la resistencia sistémica y crecimiento vegetal
Consorcio microbiano	55-75% in vitro	Antibiosis	Formación de enzimas líticas y polimixinas. Situación que propicia la sinergia con las distintas cepas bacterianas.
Pseudomonas spp	60–70% in vitro	Antibiosis	Presenta un rendimiento intermedio entre <i>Bacillus</i> y <i>Trichoderma</i> .

3.3. Evaluación de la aplicabilidad de MBCA en Colombia

En esta sección se presentan los resultados derivados del análisis comparativo de los estudios seleccionados, donde se sintetizaron las condiciones experimentales reportadas, la duración de los ensayos, el ambiente de crecimiento y el origen de lo. Esta información se resume en la **Tabla 4**, que consolida las principales características de cada MBCA y su relación con los parámetros ambientales de los ensayos para analizar la aplicabilidad del biocontrol.

Tabla 4. Matriz de evaluación de aplicabilidad de biocontrol

MBCA	Medida de efectividad	Variedad de Musa spp.	Origen MBCA	de	Método de aplicación	Condiciones ambientales	Duración del ensayo
<i>Streptomyces sp.</i> <i>YYS-7</i>	In vitro: diámetro de zona de inhibición. In vivo: reducción de clorosis y síntomas de marchitez.	No reporta	Rizosfera	de	In vivo: caldo de fermentación In vitro: bloques de micelio de <i>Streptomyces sp.</i>	In vitro: 28 °C In vivo: 28 °C	In vitro: 5-7 días In vivo: 5 semanas
<i>Trichoderma Parareesei</i> N4-3	In vitro: porcentaje de inhibición de crecimiento In vivo: reducción de índice de	Musa acuminata L. AAA genotype cv. Cavendish	Rizosfera plantación banano	de	In vivo: caldo de fermentación In vitro: bloques de micelio de <i>Trichoderma Parareesei</i> N4-3	In vivo: 28 °C con humedad entre 70% y 80% In vitro: 28 °C	In vitro: 7 días In vivo: 60 días

enfermedad						
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> S185	In vitro: inhibición visible en placa In vivo: reducción visible de síntomas de marchitez	No reporta	Costa marina	In vivo: suspensión bacteriana In vitro: inoculación con estría en ensayo de cultivo doble.	In vitro: 28 °C, 37 °C, 42 °C, 50 °C In vivo: 30 °C	In vitro: 7 días In vivo: 7-8 días
<i>Streptomyces rochei</i>	In vitro: Inhibición de crecimiento radial In vivo: reducción de síntomas visibles de marchitez y reducción de clorosis	Cavendish	Rizosfera de plantación de bananos infectados por Foc	In vitro: inoculación con estría In vivo: caldo de almidón caseína	In vitro: 28 °C In vivo: 28 °C 80% humedad	In vitro: 7 días In vivo: 42 días
<i>Streptomyces sp.</i> XY006	In vitro: inhibición de crecimiento In vivo: reducción de síntomas de la enfermedad	Cavendish	Plantación de té	In vivo: suspensión bacteriana In vitro: No reporta	In vivo: 28 °C, 78% humedad	In vivo: 10 días In vitro: 12 días
<i>B. velezensis</i> B4158, <i>B. atrophaeus</i> B363B, <i>B. amyloliquefaciens</i> B942, <i>S. morookaensis</i> B12429, y <i>L. plantarum</i> AM2	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: reducción de síntomas de la enfermedad	Cavendish	Cepa conservada	In vitro: inoculación con estría en ensayo de cultivo doble In vivo: suspensión bacteriana en buffer fosfato salino	Sin especificar	In vitro: 7 días In vivo: 8 semanas
<i>B. amyloliquefaciens</i> W19	In vivo: reducción de incidencia de enfermedad In vitro: inhibición de crecimiento	Cavendish	Cepa ATCC conservada	In vivo: suspensión bacteriana en los sustratos orgánicos y en las plántulas de banano In vitro: suspensión bacteriana	In vitro: 30 °C	In vivo: En maceta: 60 días En campos: 4 meses In vitro: 80 horas

<i>Bacillus velezensis</i> YN2111	In vitro: inhibición de crecimiento In vivo: disminución de síntomas de enfermedad	Brazilian Cavendish AAA	Rizosfera de plantación de banano infectada con Foc TR4	In vitro: inoculación directa con estría en ensayo de cultivo doble In vivo: sin especificar	In vitro: 28 °C In vivo: 25 °C - 35 °C a 50-80% de humedad	In vitro: 7 días In vivo: 130 días
<i>Bacillus velezensis</i> YN1910	In vitro; inhibición de crecimiento In vivo: reducción de índice de la enfermedad	Brazilian Cavendish AAA	Rizosfera de plantación de banano sana e infectada	In vitro: inoculación directa de colonia aislada en ensayo de cultivo doble In vivo: aplicación de caldo de fermentación	In vitro: 28 °C In vivo: No reporta	In vitro: 7 días In vivo: 40 días
<i>Paenibacillus terrae</i> , <i>Burkholderia cepacia</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Paenibacillus polymyxa</i>	In vivo: eficiencia de control de enfermedad	Cavendish williams	Cepas adquiridas de laboratorio	In vivo: El agente microbiano compuesto se aplicó en medio de cultivo líquido de fermentación , <i>Trichoderma harzianum</i> se aplicó como esporas y <i>Paenibacillus polymyxa</i> en caldo de fermentación	In vivo: clima monzónico subtropical húmedo, temperatura promedio de 21,6 °C, lluvias de 1048 mm, 93 metros sobre el nivel del mar y suelo con pH de 4.2	In vivo: 5 meses
<i>Streptomyces malaysiensis</i> 8ZJF-21	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: reducción de síntomas de la enfermedad	Cavendish cv. Brazil	Tejidos de plantas medicinales	In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: aplicación de suspensión bacteriana	In vitro: 28 °C In vivo: invernadero con luz natural a 28 °C	In vitro: 10 días In vivo: 30 días
<i>Bacillus velezensis</i> YEBBR6	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: Reducción de síntomas	Banano cv. Karpooravalli (ABB)	Cultivos de Banana cv. Yengambi KM5 (AAA)	In vitro: inoculación con estría en ensayo de cultivo doble In vivo: suspensión bacteriana	In vitro: 28 °C In vivo: condiciones de invernadero	In vitro: 7 días In vivo: 8 semanas

		de enfermedad					
<i>Streptomyces sp. H4</i>	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: reducción de incidencia de enfermedad	Musa acuminata AAA genotipo cv. Cavendish	Muestra coral	de	In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: caldo de fermentación	In vitro: 7 días In vivo: 70% humedad relativa 28C	In vitro: 7 días In vivo: 49 días
<i>Streptomyces sp. WHL7</i>	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: reducción de síntomas de la enfermedad	No reporta	Muestra coral blando	de	In vitro: inoculación directa de asilado In vivo: caldo de fermentación	In vitro: 28C In vivo: 28C a 70% de humedad	In vitro: 7 días In vivo: 40 días
<i>Bacillus spp. YN0904 y YN1419</i>	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: porcentaje de control	Brazilian (Cavendish, AAA)	Rizosfera plantación banano	de	In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: caldo de fermentación	In vitro: 28C In vivo: condiciones de invernadero	In vitro: 7 días In vivo: 40 días
<i>Trichoderma reesei CSR-T-3</i>	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: reducción de índice de enfermedad	Grand Naine	Rizosfera plantación banano	de	In vitro: discos de micelio de ensayo de cultivo doble In vivo: caldo de fermentación	In vitro: 22C In vivo: 29C-32C a 70% de humedad	In vitro: 72 horas In vivo: 90 días In vivo (plantación): 8 meses
<i>Bacillus subtilis TR21</i>	In vivo: promoción de crecimiento de la planta	Brazil Cavendish AAA	No reporta		In vivo: suspensión bacteriana	In vivo: 26C a 70%-80% humedad relativa	In vivo: 85 días
<i>Bacillus velezensis EB1</i>	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: reducción de incidencia de enfermedad	Cavendish banano (AAA) cv. "Brazilian"	Plantas banano	de	In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: suspensión bacteriana	In vitro: 28C In vivo: 22C	In vitro: 5 días In vivo: No reporta
<i>Streptomyces spp.</i>	In vitro: porcentaje de inhibición	Musa (Grupo ABB)	Rizosfera plantación de tomates contaminado por Foc	de	In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble	In vitro: 28C In vivo: 30-33 °C/25-28 °C luz natural	In vitro: 7 días In vivo: 60 días

	In vivo: porcentaje de control				In vivo: caldo de fermentación		
<i>Bacillus spp.</i>	In vivo: índice de enfermedad	Prata-afía (AAB)	Cepa laboratorio	de	In vivo: suspensión bacteriana	Condicione s de invernadero	In vivo: 90 días
<i>Bacillus velezensis EB1</i>	In vivo: índice de enfermedad In vitro: porcentaje de inhibición	Cavendish banana Musa spp. AAA cv. 'Brazilian'	Rizosfera		In vivo: suspensión bacteriana In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble	In vivo: 28 °C 40% humedad In vitro: 28 °C	In vivo: No reporta In vitro: 5 días
<i>Streptomyces BITDG-11</i>	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: índice de enfermedad	Cavendish Brazilian	Rizosfera		In vitro: inoculación en método de difusión en agar In vivo: suspensión bacteriana	In vitro: 28 °C In vivo: 28 °C a 70%- 80% humedad relativa	In vitro: 7 días In vivo: No reporta
<i>Trichoderma spp.</i> y <i>Bacillus spp.</i>	In vivo: reducción de síntomas de enfermedad In vitro: porcentaje de inhibición	Gros Michel	Cepas aisladas de investigacione s previas		In vivo: suspensión In vivo: suspensión	In vivo: 21,4 °C humedad 60% In vitro: 25 °C	In vivo: 5 meses In vitro: 7 días
<i>Bacillus subtilis,</i> <i>Bacillus velezensis,</i> y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	In vitro: inhibición de crecimiento In vivo: colonizació n del MBCA en la planta	No reporta	Cultivo banano	de	In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: suspensión bacteriana	In vitro: 28 °C In vivo: 30 °C 80% humedad	In vitro: 7 días In vivo: No reporta
<i>Streptomyces sp.</i> 5-4	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: porcentaje de biocontrol	No reporta	Plantas medicinales		In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: caldo de fermentación	In vitro: 28 °C In vivo: 18 °C noche y 28C día	In vitro: 7 días In vivo: 60 días
<i>Pseudomonas aeruginosa 91</i>	In vitro: porcentaje de inhibición	No reporta	Rizosfera plantación banano	de	In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: suspensión bacteriana	In vitro: 28 °C In vivo: 30 °C	In vitro: 7 días In vivo: 72 horas

<i>Trichoderma Brev T069</i>	In vivo: porcentaje de biocontrol	Nan Tian Huang	Cáscara de yuca	de	In vivo: polvo de esporas	In vivo: 28 °C 50%-60% humedad	In vivo: 1 mes
<i>Pseudomonas spp.</i>	In vivo: inhibición de crecimiento In vitro: reducción de síntomas de enfermedad	Grand Nain Cavendish	Rizosfera de plantación de banano	de	In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: suspensión bacteriana	In vitro: No reporta In vivo: 26 °C humedad 65%	In vitro: No reporta In vivo: 90 días
<i>Streptomyces CH06</i>	In vitro: zona de inhibición In vivo: porcentaje de control	Brazil Banana No. 1	Muestra coral	de	In vitro: inoculación en método de papel de filtro In vivo: suspensión de esporas	In vitro: No reporta In vivo: No reporta	In vitro: No reporta In vivo: 40 días
<i>Trichoderma koningiopsis Tk905</i>	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: porcentaje de inhibición de enfermedad	Cavendish (AAA)	Orquídeas dendrobium		In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: suspensión de esporas	In vitro: 28 °C In vivo: 28 °C - 32 °C	In vitro: 7 días In vivo: 45 días
<i>Trichoderma virens XZ11-1</i>	In vitro: porcentaje de inhibición In vivo: porcentaje de biocontrol	Musa AAA group, Cavendish cv. Brazil	Champiñones (<i>Pluteus pantherinus Uchida</i>)		In vitro: inoculación en ensayo de cultivo doble In vivo: caldo de fermentación	In vitro: No reporta In vivo: 28 °C	In vitro: No reporta In vivo: 45 días
<i>Bacillus amyloliquefaciens QST713</i>	In vitro: índice de enfermedad	Brazilian (AAA)	Cepa conservada en laboratorio		In vivo: suspensión bacteriana	In vivo: 32 °C 50-60% humedad	In vivo: 97 días

Las variedades encontradas corresponden principalmente a Cavendish (AAA), acompañada por Grand Nain (AAA), Prata-Aña (AAB) y Gros Michel (AAA). Este orden corresponde a la sensibilidad con la raza TR4, vital para la propuesta de biocontrol. Sin embargo, la baja documentación de variedades locales afecta la comprensión de resultados en distintas zonas agroecológicas. Por ende, el biocontrol corresponde al genotipo de la planta como lo muestran los ensayos a partir de formas Gros Michel y Prata- Aña. Situación que permite modificar los MBCA según el contexto.

El análisis de los 32 artículos seleccionados permitió evidenciar una diversidad significativa en cuanto al origen de los MBCA, las condiciones ambientales de los ensayos y los métodos de aplicación, factores que condicionan directamente su eficacia frente a *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* (Foc) y su adopción en las condiciones agroecológicas colombianas. Se observó sobre el origen de los MBCA que en su mayoría proceden de la rizosfera de plantaciones de banano sanas o infectadas por Foc (Wei et al., 2020; Xie et al., 2023), lo que sugiere una adaptación natural de estos microorganismos al ambiente del cultivo de banano. Otras investigaciones exploraron

fuentes no convencionales, como ecosistemas marinos, de donde se aislaron cepas de *Bacillus amyloliquefaciens* S185 y *Streptomyces sp. WHL7* con alta capacidad antifúngica (Singh et al., 2021; Wang et al., 2022). Estas cepas marinas sugieren ser termotolerantes y resistir condiciones de salinidad, características que podrían favorecer su supervivencia en zonas costeras del caribe colombiano.

La mayoría de las condiciones ambientales en las que los ensayos se desarrollaron fueron entre 25 y 30 °C, con humedades relativas del 60 % al 80 %, lo cual coincide con el rango térmico y de humedad presente en las zonas bananeras de Colombia (Urabá, Magdalena y La Guajira). En este sentido, *Trichoderma reesei* CSR-T-3 (Damodaran et al., 2020) mostró una reducción del 46,5 % al 10,5 % en la incidencia de enfermedad bajo condiciones controladas, mientras que el agente microbiano compuesto por *Paenibacillus terrae*, *Burkholderia cepacia*, *Bacillus amyloliquefaciens* y *Trichoderma harzianum* (Du et al., 2024) demostró eficacia en ensayos realizados en plantaciones de banano, reforzando su aplicabilidad en territorios de clima cálido y húmedo. La similitud entre las condiciones de los ensayos asiáticos y las de Colombia permite inferir una alta compatibilidad ambiental de los MBCA identificados.

La valoración de viabilidad, síntesis y extracción para establecer el uso de los agentes de control biológico microbiano (MBCA) en las condiciones propias del país (Colombia). Para ello se agruparon las variables como duración del ensayo, origen, condiciones ambientales, método de aplicación y eficacia. Complementados por parámetros relevantes en los que se incluyen costos, normativa y requerimiento técnico.

Con la finalidad de interpretar los resultados obtenidos. Se estructuró una escala cuantitativa-cualitativa con una valoración de cinco niveles, establecidas por una evaluación ponderada para determinar la viabilidad de las propuestas de control diseñadas.

Tabla 5. Ponderación nivel de viabilidad

Nivel	Descripción general	Indicadores
1 (Muy baja)	Bajo respaldo informativo y demostraciones insuficientes	No presenta características aplicables al territorio; Eficacia menor al 50%
2 (Baja)	Reportes restringidos por los parámetros establecidos	Experimentación en laboratorio con rendimiento medio no replicable en terreno
3 (Media)	Requiere ajustes con resultados de aceptable cumplimiento	Evidencia ajustes técnicos; Eficacia en rangos de 60-70%
4 (Alta)	Cumplimiento de la mayoría de variables, con aplicación al territorio	Acorde a mayor parte de parámetros; viabilidad 70-85%
5 (Muy alta)	Garantiza condiciones para desarrollarla en la zona de interés	Acota la totalidad de requerimientos en cada parámetro de forma satisfactoria y replicable; con una eficacia mayor al 95%

Los puntajes obtenidos se estimaron por medio de triangulación de fuentes, en las que se agrupan documentos técnicos de Agrosavia, ministerio de ciencia, ambiente y desarrollo sostenible, tecnología e innovación, política nacional de bioeconomía, norma técnica colombiana y resolución 1580 de 2022 del instituto agrícola Colombiano ICA.

A continuación, se presenta la valoración obtenida en base a todos los artículos luego de la ponderación de variables estimadas.

Tabla 6. Viabilidad MBCA

Tipo de viabilidad	Puntaje (1-5)	Variables	Fundamento
Técnica	3	Duración del ensayo, método de aplicación,	Las condiciones propias de las zonas bananeras colombianas, en donde predominan condiciones

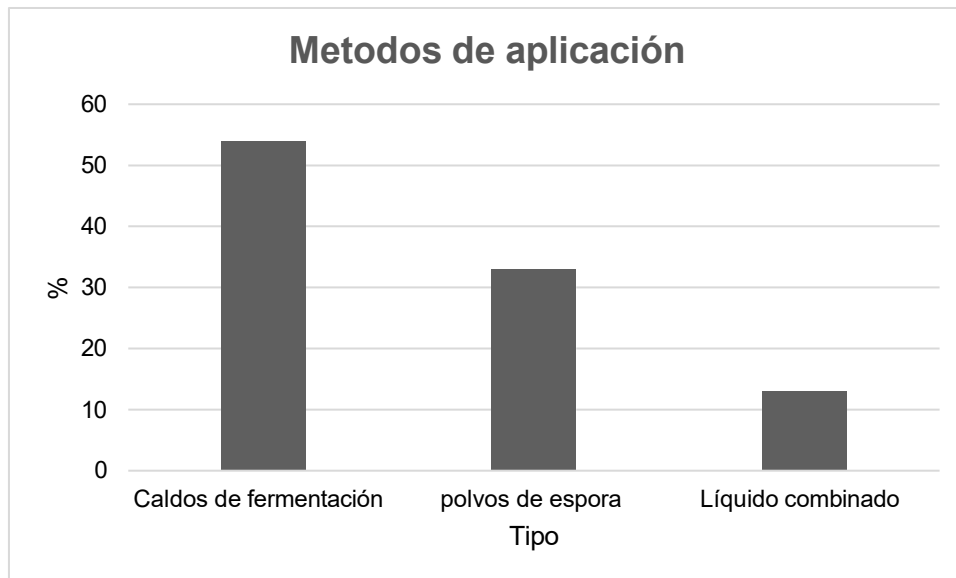
		eficacia promedio (in vitro e in vivo)	tropicales entre 25 y 30°C con humedades relativas que oscilan entre 60 – 80. Son compatibles a las zonas de los estudios sistematizados, quienes obtuvieron eficiencias entre 60-85% en condiciones in vivo y 60 a 90% en condiciones in vitro. Con los grupos <i>Bacillus velezensis</i> , <i>Streptomyces sp</i> y <i>Trichoderma</i> . Se considera la falta de evidencia en el territorio, aunque se reconoce las capacidades de replicar ensayos por parte de agrosavia, universidades y normativas de calidad NTC 5830.
Normativa	3	Control de calidad, identificación de cepas, registro bioplaguicidas	Existen protocolos que velan por el seguimiento del proceso y evidencia del mismo, consideraciones que garantizan bases para la implementación de MBCA. Entre las que se encuentran, el mandato normativo-técnico expedido por el ANLA en el año 2022 para controladores biológicos y bioinsumos, la norma técnica colombiana NTC 5830 con el estudio de puntos críticos de control y análisis de peligros y Resolución 68370 de 2020 ICA establece la inscripción de bioinsumos. Sin embargo, no se cuenta con una formulación específica para Foc TR4.
Económica	3	Origen del MBCA, aplicación y costos de producción	En Colombia, la formalización de antipatógenos locales sería una ventaja. En consideración las cepas de microorganismos podrían generar una barrera operacional en términos de costos elevados, aún, siendo menor el costo por prevención y control que el de pérdida total. (Ritter et al., 2024)
Ambiental	3	Persistencia ecológica, condiciones ambientales	La baja toxicidad y la elevada resistencia de géneros <i>Bacillus</i> y <i>Trichoderma</i> , se ven favorecidas por las condiciones del territorio colombiano con suelos franco arcillosos (Chamorro Bello et al., 2025; Corrales Ramírez et al., 2017). Aunque, se debe tener en cuenta la adaptación de cepas para evitar la competencia con microorganismos nativos. (Corrales Ramírez et al., 2017)

La aplicación en Colombia presenta una viabilidad media con un puntaje de tres sobre cinco. Derivado de la ausencia de bioproductos registrados para Foc TR4, la falta de infraestructura afecta directamente los costos de producción. En consideración, el entorno edáfico y climático es equiparable a las zonas tropicales donde se efectuaron ensayos MBCA. Donde se reportaron eficiencias de géneros *Bacillus*, *Streptomyces* y *Bacillus* que oscilan entre 60% y 100%.

3.4. Metodologías de aplicación y condiciones experimentales

La evaluación y evolución metodológica de los ensayos a partir de MBCA, se centraron en placa dual o difusión de agar para estudios in vitro, acompañados por la aplicación de estudios metagenómicos y ensayos de campo en estudios más actuales para observar el microbiota posterior a la aplicación. En complemento, el tiempo de los ensayos abarcan rangos entre 30 y 130 días en prácticas in vivo, mientras 5 y 12 días para in vitro (Wan Tajudin Shah et al., 2025; WANG et al., 2016). Esto permite inferir periodos de observación entre 60 y 90 días para interpretar la interacción patógena con la planta, considerando algunos obstáculos para describir su comportamiento en campo.

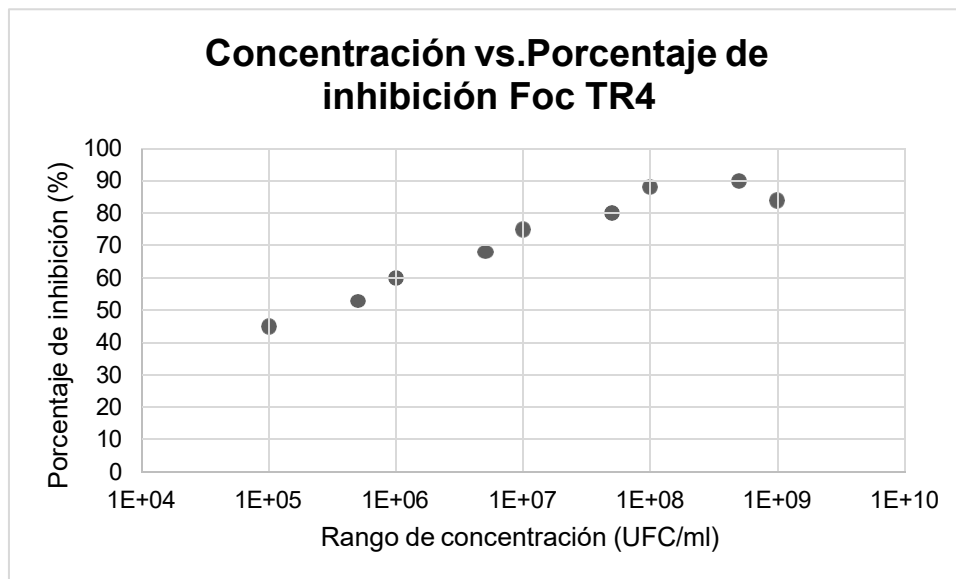
Figura 5. Formas de manejo



Fuente: Elaboración propia

La metodología aplicada para la incorporación del microorganismo al ambiente contaminado fue del 54% para suspensiones bacterianas o caldos de fermentación, 33% polvos de esporas de *Trichoderma* y 13% formulaciones líquidas combinadas. Estas medidas sugieren adaptación de la cepa portadora para su supervivencia en el medio.

Figura 6. Comparación proporción y control



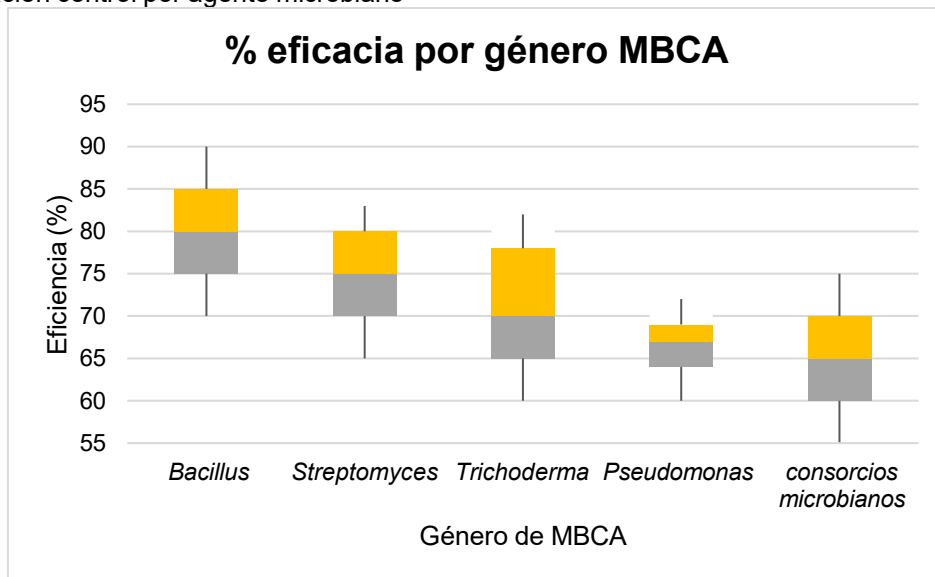
Fuente: Elaboración propia

Las concentraciones utilizadas en los estudios reflejan la variabilidad tanto del tipo de diseño experimental como tipo de microorganismo. En condiciones in vivo se incorporaron dosis de 10^7 a 10^9 UFC/ml o similares en esporas/g, Entre tanto in vivo consideraron 10^5 y 10^8 UFC/ml. Teniendo en cuenta la variedad de mediciones y estimaciones, los valores con mejores resultados oscilaron entre 10^7 - 10^8 UFC/ml, con tratamiento del 70% contra Foc TR4. Este dato es vital para la aplicación de próximos ensayos.

Los estudios presentaban heterogeneidad de condiciones, por tanto, es importante considerar sesgos medibles por medio de prácticas estandarizadas en experimentación.

3.5. Análisis comparativo de la efectividad por tipo de agente microbiano

Figura 7. Estimación control por agente microbiano



El grado de acción y desarrollo de control por parte de los géneros microbianos estuvo encabezado por *Bacillus velezensis* en un 70 a 90%, *Trichoderma parareesei* entre 60 a 85%, *Streptomyces sp.* 65 a 90%, *Pseudomonas* 60y 70%, consorcios microbianos 55 y 75%. Entre sus bondades está ayudar a controlar el agente patógeno y su buen desempeño en suelos tropicales.

Estudios complementarios a la revisión sistemática reportan al género *Bacillus* cifras de regulación dispersas con un 65% de media. Aunque considera 100% de índice de incidencia y severidad respecto a la patología (Viera et al., 2020; Saravanan et al., 2022). Respecto la especie *Trichoderma* resalta igualmente la dispersión de registros con una media de 61%, resaltando *Trichoderma asperellum* con 94.44% de control biológico respecto al Foc. (Rahman et al., 2021). Describen menos volatilidad de resultados en *Streptomyces* contemplando una media de 72.3%, llegando a máximos de 89.4% de afectación del Foc.

Por otra parte, los consorcios microbianos resaltan el potencial de combinaciones en las que intervienen *Trichoderma*, *Pseudomonas* y *Glomus* con 100% de desempeño en plántulas (Sumathi et al., 2016). Se reconoce la falta de estudios para explicar y replicar los ensayos aprovechando tanto la sinergia de los microorganismos como la réplica de condiciones establecidas.

El control reportado para *Fusarium oxysporum f. sp. Cubense* TR4, se graficó por medio de la sistematización de los estudios caracterizados, donde se estimaron parámetros estadísticos como valores mínimos y máximos, cuartiles 1 y 3 y mediana. En consecuencia, se representó una estandarización de la capacidad de control del hongo, evidenciando que *Bacillus* y *Streptomyces* muestran mejores resultados y menor dispersión. Situación que varía en una pequeña proporción en *Pseudomonas* y consorcios microbianos, sugiriendo la importancia de las condiciones del medio y el tipo de agente estudiado.

3.6. Limitaciones y perspectivas para la implementación en Colombia

El análisis de los artículos contó con limitaciones para determinar de manera completa y con estricto criterio la viabilidad de las técnicas empleadas. Empezando por la baja cantidad de estudios en la región, en Colombia solo se estableció un estudio con las características necesarias; se identificaron diversos diseños experimentales,

cepas y variabilidad en las concentraciones, no se tenía a disposición un metaanálisis valorado para el gran panorama de indicadores, falta de detalles concretos en la parte económica por ciclo productivo o hectárea.

En consideración, se podrían diseñar ensayos de más de 120 días con experimentos de campos locales, el análisis del comportamiento de los suelos colombianos a cepas nativas, un reporte específico que considere los aspectos económicos y técnicos en el desarrollo de ensayos, acompañado de protocolos estandarizados por organismos como ICA y ANLA (ICA, 2025).

1. CONCLUSIONES

Los géneros identificados a partir del análisis sistemático se componen por *Bacillus spp*, *Trichoderma spp*, *Streptomyces spp.*, *Pseudomonas spp* y consorcios microbianos variados. De igual forma se identifica al continente asiático, como la mayor fuente de estudios principalmente localizados en China, seguidos en menor proporción por India y con un solo aporte Malasia, Tailandia, Brasil y Colombia. La fase de experimentación de las investigaciones desarrolló pruebas in vitro, considerando que en la actualidad se observa el aumento de fases en campo e in vivo. Se tiene mayor conocimiento por parte del género *Bacillus spp*, *Streptomyces spp* y *Trichoderma spp*, resaltando *Bacillus velezensis* y *Trichoderma harzianum* por el aporte de metabolitos antifúngicos y amplia adaptabilidad al medio.

Las cepas *Bacillus spp* y *Streptomyces spp* evidenciaron eficacias con mejores desempeños bajo las concentraciones 10^7 y 10^8 UFC/ml, alcanzando porcentajes de control superiores al ochenta por ciento. La inducción sistémica, competencia por nutrientes y la antibiosis se destacaron como los componentes dominantes. Cabe aclarar que se presenta gran heterogeneidad de resultados causados por las diferencias de metodologías empleadas en conjunto con la falta de estandarización de un método de análisis. Por tanto, es de gran importancia generar protocolos similares de aplicación para valorar de manera holística los resultados obtenidos bajo escenarios comparables.

Como producto final de la evaluación de características técnicas, ambientales, económicas y normativas, se estimó una viabilidad media derivada de la controlada huella ecológica, características climáticas del país con zonas tropicales, el escaso registro de bioproductos caracterizados, costos tanto de funcionamiento como operación y su proyección a escala. Por tanto, es evidente la necesaria puesta en marcha de mayores ensayos de propuesta de control microbiológica bajo escenarios favorables de aplicación.

Este contexto sugiere amplio marco de técnicas y metodologías empleadas que deben ser probadas en el territorio colombiano.

2. AGRADECIMIENTOS

3. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo

4. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

El formato para la citación de referencias bibliográficas será tipo APA. Para ello podrá utilizar diferentes gestores bibliográficos tales como EndNote Web, Reference Manager, Mendeley, etc.

1. Wei, Y., Zhao, Y., Zhou, D., Qi, D., Li, K., Tang, W., Chen, Y., Jing, T., Zang, X., Xie, J., & Wang, W. (2020). A newly isolated *Streptomyces* sp. YYS-7 with a broad-spectrum antifungal activity improves the banana plant resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1712. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01712>
2. Zhang, H., Liu, H., Li, W., Zhang, Z., Wang, S., Zhang, J., & Wu, W. (2023). A newly isolated *Trichoderma parareesei* N4-3 exhibiting a biocontrol potential for banana fusarium wilt by hyperparasitism. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1212424. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1212424>
3. Singh, P., Xie, J., Qi, Y., Qin, Q., Jin, C., Wang, B., & Fang, W. (2021). A Thermotolerant Marine *Bacillus amyloliquefaciens* S185 Producing Iturin A5 for Antifungal Activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Marine Drugs*, 19(9), 516. <https://doi.org/10.3390/md19090516>
4. Jegan, P., Sethurathinam, S., Iyyamperumal, M., Jacob, R., Kathithachalam, A., Mannu, J., Padmanabhan, S., & Gajendiran, M. (2025). Antifungal and plant-growth promoting potency of *Streptomyces rochei* against biotic stress caused by Race 4 *Fusarium* wilt on banana. *Plant Stress*, 15, 100779. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100779>
5. Wang, X., Du, Z., Chen, C., Guo, S., Mao, Q., Wu, W., Wu, R., Han, W., Xie, P., Zeng, Y., Shan, W., Wang, Z., & Yu, X. (2023). Antifungal effects and biocontrol potential of lipopeptide-producing *Streptomyces* against banana *Fusarium* wilt fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1177393. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1177393>
6. Wan Tajudin Shah, W. A. N., Abd Murad, N. B., Ong, J. X., Ang, S. H., Nur, L., & Saidi, N. B. (2025). Antifungal potential of *Lactiplantibacillus plantarum* AM2 against banana pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 27(4), 763–773. <https://doi.org/10.22034/JAST.27.4.763>
7. WANG, B., SHEN, Z., ZHANG, F., RAZA, W., YUAN, J., HUANG, R., RUAN, Y., LI, R., & SHEN, Q. (2016). *Bacillus amyloliquefaciens* Strain W19 can Promote Growth and Yield and Suppress *Fusarium* Wilt in Banana Under Greenhouse and Field Conditions. *Pedosphere*, 26(5), 733–744. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60083-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60083-2)
8. Yu, H., Zhou, G., Zhang, W., Omondi, B. A., Cenci, A., Liu, K., Liu, J., Fan, H., Li, S., Rouard, M., & Zheng, S. J. (2025). *Bacillus velezensis* YN2111 reveals the potential role of amine oxidase in *Fusarium* wilt response in Cavendish bananas. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102653>
9. Fan, H., He, P., Xu, S., Li, S., Wang, Y., Zhang, W., Li, X., Shang, H., Zeng, L., & Zheng, S. J. (2023). Banana disease-suppressive soil drives *Bacillus* assembled to defense *Fusarium* wilt of banana. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1211301>
10. Du, C., Yang, D., Jiang, S., Zhang, J., Ye, Y., Pan, L., & Fu, G. (2024). Biocontrol Agents Inhibit Banana *Fusarium* Wilt and Alter the Rooted Soil Bacterial Community in the Field. *Journal of Fungi*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/jof10110771>
11. Zhang, L., Liu, Z., Wang, Y., Zhang, J., Wan, S., Huang, Y., Yun, T., Xie, J., & Wang, W. (2022). Biocontrol Potential of Endophytic *Streptomyces malaysiensis* 8ZJF-21 From Medicinal Plant Against Banana *Fusarium* Wilt Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.874819>
12. Saravanan, R., Nakkeeran, S., Saranya, N., Kavino, M., Ragapriya, V., Varanavasiappan, S., Raveendran, M., Krishnamoorthy, A. S., Malathy, V. G., & Haripriya, S. (2022). Biohardening of Banana cv. Karpooravalli (ABB; Pisang Awak) With *Bacillus velezensis* YEBBR6 Promotes Plant Growth and Reprograms the Innate Immune Response Against *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense*. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.845512>
13. Li, X., Li, K., Zhou, D., Zhang, M., Qi, D., Jing, T., Zang, X., Qi, C., Wang, W., & Xie, J. (2021). Biological control of banana wilt disease caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* using *Streptomyces* sp. H4. *Biological Control*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104524>
14. Wang, J., Cai, B., Li, K., Zhao, Y., Li, C., Liu, S., Xiang, D., Zhang, L., Xie, J., & Wang, W. (2022). Biological Control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 in Banana Plantlets Using Newly Isolated *Streptomyces* sp. WHL7 from Marine Soft Coral. *Plant Disease*, 106(1). <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-21-1275-RE>
15. Fan, H., Li, S., Zeng, L., He, P., Xu, S., Bai, T., Huang, Y., Guo, Z., & Zheng, S. J. (2021). Biological control of *Fusarium oxysporum* f. Sp. *cubense* tropical race 4 using natively isolated *Bacillus* spp. yn0904 and yn1419. *Journal of Fungi*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/jof7100795>

16. Damodaran, T., Rajan, S., Muthukumar, M., Ram Gopal, Yadav, K., Kumar, S., Ahmad, I., Kumari, N., Mishra, V. K., & Jha, S. K. (2020). Biological Management of Banana Fusarium Wilt Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 Using Antagonistic Fungal Isolate CSR-T-3 (*Trichoderma reesei*). *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.595845>
17. Sun, Y., Huang, B., Cheng, P., Li, C., Chen, Y., Li, Y., Zheng, L., Xing, J., Dong, Z., & Yu, G. (2022). Endophytic *Bacillus subtilis* TR21 Improves Banana Plant Resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and Promotes Root Growth by Upregulating the Jasmonate and Brassinosteroid Biosynthesis Pathways. *Phytopathology*, 112(2), 219–231. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-21-0159-R>
18. Xiang D, Yang X, Liu B, Chu Y, Liu S and Li C (2023) Bio-priming of banana tissue culture plantlets with endophytic *Bacillus velezensis* EB1 to improve *Fusarium* wilt resistance. *Front. Microbiol.* <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1146331>
19. Kawicha, P., Nitayaros, J., Saman, P., Thaporn, S., Thanyasiriwat, T., Somtrakoon, K., Sangdee, K., & Sangdee, A. (2023). Evaluation of Soil *Streptomyces* spp. for the Biological Control of *Fusarium* Wilt Disease and Growth Promotion in Tomato and Banana. *Plant Pathology Journal*, 39(1), 108–122. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.08.2022.0124>
20. Da Silva Vieira, L. C., Costa, S. N., Borges, C. V., Gonçalves, Z. S., & Haddad, F. (2020). *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* biocontrol mediated by *Bacillus* spp. In Prata-Anã banana. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 15(3). <https://doi.org/10.5039/AGRARIA.V15I3A8030>
21. Liu, S., Yang, W., Yang, X., Gong, R., Xiang, D., & Li, C. (2024). Integrated control of *Fusarium* wilt in banana by *Bacillus velezensis* EB1 and potassium sorbate. *BMC Microbiology*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03549-1>
22. Zhang, L., Zhang, H., Huang, Y., Peng, J., Xie, J., & Wang, W. (2021). Isolation and Evaluation of Rhizosphere Actinomycetes With Potential Application for Biocontrolling *Fusarium* Wilt of Banana Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.763038>
23. Izquierdo-García, L. F., Carmona-Gutiérrez, S. L., Moreno-Velandia, C. A., Villarreal-Navarrete, A. del P., Burbano-David, D. M., Quiroga-Mateus, R. Y., Gómez-Marroquín, M. R., Rodríguez-Yzquierdo, G. A., & Betancourt-Vásquez, M. (2024). Microbial-Based Biofungicides Mitigate the Damage Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Race 1 and Improve the Physiological Performance in Banana. *Journal of Fungi*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/jof10060419>
24. He, P., Li, S., Xu, S., Fan, H., Wang, Y., Zhou, W., Fu, G., Han, G., Wang, Y. Y., & Zheng, S. J. (2021). Monitoring Tritrophic Biocontrol Interactions Between *Bacillus* spp., *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, Tropical Race 4, and Banana Plants in vivo Based on Fluorescent Transformation System. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.754918>
25. Yun, T., Jing, T., Zhou, D., Zhang, M., Zhao, Y., Li, K., Zang, X., Zhang, L., Xie, J., & Wang, W. (2022). Potential Biological Control of Endophytic *Streptomyces* sp. 5-4 Against *Fusarium* Wilt of Banana Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4. *Phytopathology*, 112(9), 1877–1895. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-11-21-0464-R>
26. Xie, J., Singh, P., Qi, Y., Singh, R. K., Qin, Q., Jin, C., Wang, B., & Fang, W. (2023). *Pseudomonas aeruginosa* Strain 91: A Multifaceted Biocontrol Agent against Banana *Fusarium* Wilt. *Journal of Fungi*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/jof9111047>
27. Zhang, C., Ali Khan, R. A., Wei, H. Y., Wang, R., Hou, J. M., & Liu, T. (2022). Rapid and mass production of biopesticide *Trichoderma* Brev T069 from cassava peels using newly established solid-state fermentation bioreactor system. *Journal of Environmental Management*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114981>
28. Cabanás, C. G. L., Fernández-González, A. J., Cardoni, M., Valverde-Corredor, A., López-Cepero, J., Fernández-López, M., & Mercado-Blanco, J. (2021). The banana root endophytome: Differences between mother plants and suckers and evaluation of selected bacteria to control *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense*. *Journal of Fungi*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/jof7030194>
29. Xiao, X., Xu, R., Wu, W., Zhang, X., Zhang, Y., Wang, L., & Luo, Y. (2025). The discovery of marine natural product Streptochlorin and its inhibition of Banana fusarium wilt by targeting the GPI pathway. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106675>
30. Luo, M., Chen, Y., Huang, Q., Huang, Z., Song, H., & Dong, Z. (2023). *Trichoderma koningiopsis* Tk905: an efficient biocontrol, induced resistance agent against banana *Fusarium* wilt disease and a potential plant-growth-promoting fungus. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1301062>

31. Cui, H., Cheng, Q., Jing, T., Chen, Y., Li, X., Zhang, M., Qi, D., Feng, J., Vafadar, F., Wei, Y., Li, K., Zhao, Y., Zhou, D., & Xie, J. (2025). *Trichoderma virens* XZ11-1 producing siderophores inhibits the infection of *Fusarium oxysporum* and promotes plant growth in banana plants. *Microbial Cell Factories*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02626-4>
32. Tian, L., Zhang, W., Zhou, G. D., Li, S., Wang, Y., Yang, B., Bai, T., Fan, H., He, P., & Zheng, S. J. (2023). A biological product of *Bacillus amyloliquefaciens* QST713 strain for promoting banana plant growth and modifying rhizosphere soil microbial diversity and community composition. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1216018>
33. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2025). Más de 34 mil millones de pesos se han invertido en la contención del *Fusarium* R4T en plátano y banano. Recuperado el 29 de mayo de 2025, de <https://www.ica.gov.co/noticias/icacontencion-fusarium-platano-banano-pmu>
34. Pegg, K. G., Coates, L. M., O'Neill, W. T., & Turner, D. W. (2019). The epidemiology of *Fusarium* wilt of banana. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1395. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01395>
35. García-Bastidas, F. A., Quintero-Vargas, J. C., Ayala-Vasquez, M., Schermer, T., Seidl, M. F., Santos-Paiva, M., Noguera, A. M., Aguilera-Galvez, C., Wittenberg, A., Hofstede, R., Sørensen, A., & Kema, G. H. J. (2019). First report of *Fusarium* wilt tropical race 4 in Cavendish bananas caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *Plant Disease*, 104(3), 994. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-1922-PDN>
36. Orr, R., & Nelson, P. N. (2018). Impacts of soil abiotic attributes on *Fusarium* wilt, focusing on bananas. *Applied Soil Ecology*, *132*, 20-33. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.06.019>
37. Ploetz, R. C. (2015). *Fusarium* wilt of banana. *Phytopathology*, 105(12), 1512–1521. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0101-RVW>
38. Ploetz, R. C. (2006). *Fusarium* wilt of banana is caused by several pathogens referred to as *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Phytopathology*, *96*(6), 653-656. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0653>
39. Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E. S., & Staver, C. P. (2018). *Fusarium* wilt of banana: Current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1468. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
40. Swarupa, V., Ravishankar, K. V., & Rekha, A. (2014). Plant defense response against *Fusarium oxysporum* and strategies to develop tolerant genotypes in banana. *Planta*, *239*(4), 735-751. <https://doi.org/10.1007/s00425-013-2024-8>
41. Kema, G. H. J., Drenth, A., Dita, M., Jansen, K., Vellema, S., & Stoorvogel, J. J. (2021). Editorial: *Fusarium* wilt of banana, a recurring threat to global banana production. *Frontiers in Plant Science*, 11, 628888. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.628888>
42. Su, H., Hwang, S., & Ko, W. (1986). Fusarial wilt of Cavendish bananas in Taiwan. *Plant Disease*, *70*(9), 814–818. <https://doi.org/10.1094/PD-70-814>
43. Ortiz, R., & Swennen, R. (2014). From crossbreeding to biotechnology-facilitated improvement of banana and plantain. *Biotechnology Advances*, *32*(1), 158-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.09.010>
44. Vásquez Basto, V., & Hurtado Sandoval, A. F. (2023). Uso de bacterias del género *Pseudomonas* como alternativa agrosostenible para el control de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* en banano [Trabajo de grado, Universidad de Cundinamarca]. Repositorio Institucional UDEC. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/5178>
45. Álvarez Flórez, V. (2023). Control biológico de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* utilizando *Trichoderma* spp. [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/54267>
46. Arango Palacio, L. (2024). Bioprospección de micovirus asociados a *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* y su potencial biocontrolador [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia]. Biblioteca Digital UdeA. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/34fb55e9-7a24-4780-93fbca1bcc9e7f6>
47. Izquierdo-García, L. F., Carmona-Gutiérrez, S. L., Moreno-Velandia, C. A., Villarreal-Navarrete, A. del P., Burbano-David, D. M., Quiroga-Mateus, R. Y., Gómez-Marroquín, M. R., Rodríguez-Yzquierdo, G. A., & Betancourt-Vásquez, M. (2024). Microbial-Based Biofungicides Mitigate the Damage Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Race 1 and Improve the Physiological Performance in Banana. *Journal of Fungi*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/jof10060419>
48. Qi, D., Zou, L., Zhou, D., Zhang, M., Wei, Y., Li, K., ... & Xie, J. (2022). Biocontrol potential and antifungal mechanism of a novel *Streptomyces sichuanensis* against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in vitro and in vivo. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(4), 1633-1649. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11788-3>

49. Rahman, S. S. M. S. A., Zainudin, N. A. I. M., & Aziz, N. A. A. (2021). Evaluation of *Trichoderma asperellum* B1902 in controlling Fusarium Wilt of cavendish banana cultivar. *Sains Malays*, 50, 2549-2561. <http://doi.org/10.17576/jsm-2021-5009-05>
50. Lv, N., Tao, C., Ou, Y., Wang, J., Deng, X., Liu, H., ... & Shen, Q. (2023). Root-associated antagonistic *Pseudomonas* spp. contribute to soil suppressiveness against banana Fusarium wilt disease of banana. *Microbiology spectrum*, 11(2), e03525-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.03525-22>
51. Vieira, L.C.S.; Costa, S.N.; Borges, C.V.; Gonçalves, Z.S.; Haddad, F. *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Biocontrol Mediated by *Bacillus* spp. in Prata-Anã Banana. *Agraria* 2020, 15, 1–7.
52. Rahman, S.S.M.S.A.; Zainudin, N.A.I.M.; Aziz, N.A.A. Evaluation of *Trichoderma asperellum* B1902 in Controlling Fusarium Wilt of Cavendish Banana Cultivar. *Sains Malays*. 2021, 50, 2549–2561.
53. Sumathi, S.; Thangavelu, R. Co-Inoculation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Their Mycorrhizae Helper. *Plant Arch*. 2016, 16, 365–375.
54. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2022). *Banana Market Review: Preliminary Results for 2022*. Rome.
55. ZHANG, M., ZHOU, D., QI, D., WEI, Y., CHEN, Y., FENG, J., WANG, W., & XIE, J. (2024). Research progress on the integrated control of Fusarium wilt disease in banana. *SCIENTIA SINICA Vitae*. <https://doi.org/10.1360/ssv-2023-0283>
56. Bubici, G., Kaushal, M., Prigigallo, M. I., Cabanás, C. G. L., & Mercado-Blanco, J. (2019). Biological control agents against Fusarium wilt of banana. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 10, Issue APR). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00616>
57. Ritter, T., Álvarez, D., Mosquera, L. E., Martey, E., & Mockshell, J. (2024). A socioeconomic and cost benefit analysis of Tropical Race 4 (TR4) prevention methods among banana producers in Colombia. *PLoS ONE*, 19(10 October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311243>
58. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2022). Protocolo técnico y normativo de bioinsumos, agroinsumos y controladores biológicos de origen natural. <https://www.anla.gov.co/> [<https://www.anla.gov.co/documentos/sipta/Protocolo/06-04-2022-anla-protocolo-bioninsumos-agroinsumos-fv-0404-2022.pdf>]
59. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2020). Resolución 068370 del 27 de mayo de 2020: Por medio de la cual se establecen los requisitos para el registro de productor, conductor por contrato, envasador, importador y departamentos técnicos de ensayos de eficacia agronómica de Bioinsumos para uso agrícola; así como los requisitos para el registro de Bioinsumos para uso agrícola. <https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2020/2020r68370>
60. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2022). Resolución 00001580 del 9 de febrero de 2022: Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el registro de los fabricantes, formuladores, envasadores, distribuidores, importadores y/o exportadores de los plaguicidas químicos de uso agrícola, así como los requisitos para el registro de plaguicidas químicos de uso agrícola y otras disposiciones. <https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2022/2022r1580>
61. Corrales Ramírez, L. C., Caycedo Lozano, L., Gómez Méndez, M. A., Ramos Rojas, S. J., & Rodríguez Torres, J. N. (2017). *Bacillus* spp: una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos. *NOVA*, 15(27), 45–66. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/nova/article/view/1958>
62. Chamorro Bello, C. E., Valencia Zapata, H., & Camero Rubio, E. (2025). *Introducción a la biología del suelo: Aspectos de su génesis y ecología*. Bogotá, D.C.: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. ISBN 978-628-96784-7-5.
63. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2019). *Norma Técnica Colombiana NTC 5830: 2019 – Requisitos para el análisis de peligros y puntos de control críticos (APPCC / HACCP)*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.