Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia

Eficacia biológica del manejo de Sigatoka negra (*Pseudocercospora fijiensis*) con *Trichoderma* spp. y *Streptomyces aureofaciens* bajo condiciones de campo

Natalia E. Molina Quesada[1*], Gabriel Solano Maroto[2], Joheny Solano Maroto[3], Lizzy Retana Villalobos[4], Gilberto Masís Solano[5]

[1]Gerente de RDI y Regulatorio de BioVENKO, [2]Supervisor de Finca Experimental, [3]Directora de PhytoLab, [4]CEO de Biotech CR GRM, [5]COO de BioVENKO

***Autor de correspondencia:**
Natalia E. Molina Quesada
nmolina@biovenko.com

Contribución:
Artículo Científico

Sección:
Fitosanidad

Recibido:
15 diciembre, 2025
Publicado:
30 abril, 2026

Cita:
Molina Quesada N, Solano Maroto G, Solano Maroto J, Retana Villalobos L, Masís Solano G. 2026. Eficacia biológica del manejo de Sigatoka negra *(Pseudocercospora fijiensis)* con *Trichoderma* spp. y *Streptomyces aureofaciens* bajo condiciones de campo. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 108 https://doi.org/10.62498/ARTC.26108

RESUMEN

La Sigatoka negra es una de las principales enfermedades del banano. Este estudio evaluó el control de esta enfermedad mediante dos agentes de biocontrol: *Trichoderma* spp. y *Streptomyces aureofaciens*, aplicados individualmente y en mezcla. El ensayo tuvo un diseño de bloques completos al azar y cinco tratamientos: testigo absoluto, *Trichoderma* spp. (375 g ha^{-1}), *S. aureofaciens* (750 g ha^{-1}), la mezcla (*Trichoderma* spp. 250 g ha^{-1} + *S. aureofaciens* 500 g ha^{-1}) y aceite mineral, con tres réplicas. La aplicación foliar de *Trichoderma* spp. y *S. aureofaciens* controla la Sigatoka negra y estimula el crecimiento de la planta de banano, como alternativa sostenible para el manejo integrado del cultivo.

Palabras clave: Cultivo de banano, Infección foliar, Control biológico

ABSTRACT

Black Sigatoka is one of the main diseases affecting banana production worldwide. This study evaluated the control of this disease using two biocontrol agents, *Trichoderma* spp. and *Streptomyces aureofaciens*, applied individually and in combination. The experiment followed a randomized complete block design with five treatments: untreated control, *Trichoderma* spp. (375 g ha^{-1}), *S. aureofaciens* (750 g ha^{-1}), the mixture (*Trichoderma* spp. 250 g ha^{-1} + *S. aureofaciens* 500 g ha^{-1}), and mineral oil, with three replicates. Foliar application of *Trichoderma* spp. and *S. aureofaciens* controls Black Sigatoka and promotes banana plant growth, providing a sustainable alternative for integrated crop management under tropical production conditions.

Keywords: Banana cultivation, Foliar infection, Biological control

Copyright: © 2026 por los autores. Licencia Acorbat Internacional. Este artículo es de acceso libre y distribuido bajo los términos de Acorbat Internacional

INTRODUCCIÓN

El banano (*Musa* spp.) es la fruta climatérica de mayor reconocimiento a nivel global y se produce de manera continua durante todo el año. Su cultivo posee gran relevancia alimentaria, al ser considerado el cuarto cultivo más importante después del arroz, el trigo y el maíz. A nivel mundial, la producción ha mostrado un crecimiento sostenido en la última década, pasando de aproximadamente 108 millones de toneladas en 2010 a 119.3 millones en 2020, lo que equivale al 16 % de la producción mundial de frutas. Este cultivo se concentra en regiones tropicales y subtropicales húmedas de América, África y Asia, ubicándose Costa Rica entre los principales exportadores, lo que consolida al banano como uno de los cultivos frutales de mayor relevancia económica para la agroindustria del país (Issara *et al*., 2024). De esta manera, el banano no solo constituye un pilar económico para los países productores, sino también un alimento esencial en la dieta de millones de personas a nivel mundial.

No obstante, el cultivo enfrenta serias limitaciones derivadas de plagas y enfermedades, las cuales comprometen tanto su productividad como su calidad. Estos desafíos se caracterizan, por un lado, por la gran diversidad de agentes causales, que incluyen hongos, bacterias, virus y plagas animales, y por otro, por el severo impacto de estas enfermedades. Entre estos agentes, los hongos destacan como algunos de los patógenos vegetales más destructivos del cultivo de banano, cuya propagación se ve favorecida por el comercio internacional y los sistemas agrícolas estandarizados, condiciones que facilitan la aparición de enfermedades emergentes con capacidad de invadir nuevas regiones productivas (Carlier *et al*., 2021; Zeng *et al*., 2024).

Entre las enfermedades que afectan al banano, la Sigatoka negra, también conocida como enfermedad de la raya negra de la hoja, se destaca por su severo impacto en la industria bananera a nivel mundial. Causada por el hongo *P. fijiensis*, esta enfermedad puede reducir la producción de fruta hasta en un 80 % y comprometer su calidad al acelerar la maduración (Becker *et al*., 2021).

El control de la Sigatoka negra se ha sustentado principalmente en el uso intensivo de fungicidas químicos, especialmente en países como Costa Rica, donde se aplican mezclas de fungicidas protectores y sistémicos mediante aspersiones aéreas frecuentes. Estas prácticas representan aproximadamente el 50 % del uso total de pesticidas en el país y tienen un costo estimado de 1 500 USD por hectárea al año. Estas aplicaciones intensivas, además de sus implicaciones económicas, ambientales y de salud ocupacional, han propiciado la creciente resistencia del patógeno, que se traduce en una pérdida de eficacia de los fungicidas, lo que a su vez exige un aumento en la frecuencia de las aplicaciones para mantener el control de la enfermedad. Así, mientras

que en la década de 1990 el control requería aproximadamente 30 aplicaciones anuales, en la última década esta cifra supera las 50, evidenciando un ciclo de dependencia y eficacia reducida (Becker *et al*., 2021). Hoy día en Costa Rica se reportan intervalos entre aplicaciones de hasta apenas 5 días.

Frente a este panorama, el manejo biológico surge como una alternativa cada vez más relevante ante los impactos y limitaciones del control químico. Los biopesticidas presentan un menor riesgo para la salud humana, tienen un impacto ambiental positivo y son compatibles con esquemas de producción orgánica. Asimismo, su acción se basa en múltiples mecanismos, tanto directos como indirectos, lo que disminuye el riesgo de que los patógenos desarrollen resistencia, posicionándolos como una estrategia sostenible y prometedora para el manejo de la Sigatoka negra en el largo plazo (Becker *et al*., 2021).

Dentro de las alternativas de biocontrol, el género *Trichoderma* ha recibido especial atención debido a su versatilidad y eficacia tanto en la protección como en la promoción del desarrollo vegetal. Diversas especies de *Trichoderma* han demostrado capacidad para antagonizar patógenos mediante mecanismos como la antibiosis, la competencia por nutrientes y el micoparasitismo. Su habilidad para producir una gran diversidad de metabolitos con amplio espectro de bioactividad refuerza su potencial como agentes de biocontrol, lo que ha motivado numerosos estudios recientes orientados a evaluar su aplicación contra hongos y bacterias fitopatógenos, y a resaltar su papel como aliados en la mejora de la productividad agrícola (Jin & Alberti, 2025).

De manera complementaria, el género *Streptomyces* representa otra fuente clave de soluciones biológicas frente a patógenos fúngicos. Estas bacterias filamentosas son reconocidas por su capacidad para sintetizar una gran diversidad de metabolitos especializados, incluidos compuestos orgánicos volátiles de naturaleza lipofílica, que ejercen una acción antifúngica intensa contra diversos fitopatógenos. Gracias a esta versatilidad metabólica, *Streptomyces* spp. emergen como una alternativa sostenible para reducir la dependencia de fungicidas sintéticos, contribuyendo así al control eficaz de la contaminación fúngica y la mitigación de los impactos ambientales asociados al uso excesivo de agroquímicos (Torres Nazari *et al*., 2023).

Frente a la creciente presión que representan las enfermedades fúngicas, especialmente la Sigatoka negra, y las limitaciones del control químico convencional, el desarrollo y aplicación de estrategias de manejo biológico se presentan como alternativas sostenibles y prometedoras. En este marco, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficacia de formulaciones de *Trichoderma* spp. y *S. aureofaciens*,

aplicadas individualmente y en combinación, para el desarrollo de estrategias de manejo más efectivas, sostenibles y seguras contra la Sigatoka negra en banano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones del ensayo

El ensayo se realizó en la Estación Experimental Biotech, Río Jiménez de Guácimo, Limón, Costa Rica (9°57.314'N, 83°59.684'O; 36 msnm), en zona de vida bosque húmedo tropical, transición a perhúmedo. Las plantas recibieron un manejo comercial uniforme en todos los tratamientos, que incluyó fertilización, manejo de arvenses, control de nematodos e insectos, y otras prácticas culturales como deshija y mantenimiento de drenajes.

Material biológico

Se emplearon plantas de banano (cv. Gran enano *Musa* AAA), obtenidas mediante cultivo de tejidos y previamente aclimatadas en vivero. Las plantas se establecieron en parcelas, cada una con siete plantas de banano, las cuales tuvieron una barrera de yute (*Musa acuminata*), resistente a *P. fijiensis*, a cada lado.

Los productos en prueba fueron un fungicida microbiológico formulado a base de *Trichoderma* spp. ($2x10^9$ UFC/g) y otro a base de *S. aureofaciens* ($1x10^9$ UFC/g). Todas las cepas corresponden a microorganismos nativos del suelo costarricense, reconocidos como agentes de biocontrol.

Diseño experimental

El ensayo se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar, con un total de cuatro tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental estuvo conformada por parcelas de siete plantas de banano, dispuestas con un distanciamiento de 2,5 m entre plantas. La unidad de evaluación estuvo constituida por las cinco plantas centrales de cada parcela. Para cada parcela se incluyó una barrera de yute, para evitar el riesgo de deriva entre aplicaciones de los diferentes tratamientos, ubicada a ambos lados y separada 2,5 m de la hilera central de las plantas en evaluación.

Los cinco tratamientos experimentales incluyeron: el testigo absoluto (sin aplicaciones para control de Sigatoka), un fungicida microbiológico formulado con tres especies de *Trichoderma* (375 g ha^{-1}), un bioinsumo formulado con el actinomicete *S. aureofaciens* (750 g ha^{-1}), un tratamiento combinado de ambos productos (250 + 500 g ha^{-1}, respectivamente) y un comparativo con solo aceite mineral (3,0 L ha^{-1}); todos los tratamientos, excepto el testigo absoluto, se aplicaron en mezcla con aceite agrícola

(3,0 L ha^{-1}), con un volumen de aplicación de 23 L ha^{-1}. Cada tratamiento contó con tres réplicas, totalizando 12 parcelas experimentales.

Aplicación de tratamientos

Para asegurar la presión de la enfermedad, el ensayo se estableció en una zona de alta incidencia natural de Sigatoka negra. Las aplicaciones se realizaron a intervalos de cinco días, para un total de catorce aplicaciones durante el ciclo experimental. Los tratamientos se aplicaron mediante una motobomba nebulizadora marca Guarany modelo UBV-6L (trabaja a presión constante con medidor de revoluciones por minuto(rpm)), previamente calibrada para la aplicación de bajos volúmenes de insumos., dirigiendo el producto a la superficie foliar.

Para minimizar riesgos de deriva, las aplicaciones se realizaron en condiciones ambientales favorables, específicamente con temperaturas inferiores a 30 °C, baja cantidad de rocío y ausencia de viento.

Variables evaluadas, identificación y puntuación de los síntomas de la enfermedad

Se realizaron evaluaciones no destructivas, en donde se consideraron el número de hojas totales (HT), hojas funcionales (HF), hoja más joven con estría (HJE), hoja más joven con mancha (HJM), altura de planta, circunferencia del pseudotallo y promedio ponderado de infección (PPI), considerando severidad según escala de Stoover modificada por Gauhl (ecuación 1) del boletín de CORBANA, número 16 (Marín y Romero, 1992):

$$PPI = \frac{\sum(Porcentaje\ de\ hojas\ en\ grado\ 0 * 0 + \cdots + (Porcentaje\ de\ hojas\ en\ grado\ 6 * 6)}{100},$$

Ecuación 1

Las evaluaciones se efectuaron a partir de la primera aplicación de los tratamientos, con intervalos de siete días entre cada una, para un total de doce evaluaciones, con el fin de analizar la eficacia y persistencia de los tratamientos durante el ciclo. De igual forma, se tomaron datos de precipitación semanal acumulada (mm).

Análisis de datos

Los datos se analizaron mediante ANOVA, bajo un modelo lineal general, o el modelo no paramétrico correspondiente. Se verificaron los supuestos del análisis estadístico. Cuando se detectaron diferencias significativas, las comparaciones de medias se realizaron con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hojas totales, hojas funcionales, hoja más joven con estría, hoja más joven con mancha

El hongo fitopatógeno *P. fijiensis* ocasiona daños severos en el follaje del banano al colonizar y destruir progresivamente los tejidos foliares, lo que reduce la capacidad fotosintética y compromete el llenado del fruto (George *et al*., 2022). En este contexto, las variables de evaluación foliar —como el número de hojas totales, hojas funcionales, la hoja más joven con estría y la hoja más joven con mancha— constituyen indicadores directos del avance de la enfermedad y, por tanto, de la eficacia del control aplicado.

El análisis de hojas totales, hojas funcionales y hoja joven con mancha mostró un efecto altamente significativo de los tratamientos y las fechas de evaluación y su interacción ($p \leq 0,05$) (Cuadro1, Cuadro 2), con excepción de la variable HT, cuya interacción tratamiento × evaluación no fue significativa. Lo anterior indica que existieron diferencias consistentes entre los tratamientos de biocontrol, el testigo absoluto y el testigo con aceite mineral y, adicionalmente, que la magnitud de estas diferencias varió a lo largo del ciclo de evaluación.

Para la variable hoja más joven con estría, el análisis de varianza no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p>0,05$) (Cuadro 1). El modelo de efectos mixtos reveló que la gran mayoría de la variabilidad (86,68 %) fue atribuible al error experimental y no a los factores controlados en el estudio.

Cuadro 1. Valores de p para los factores de hojas totales (HT), hojas funcionales (HF), hoja más joven con estría (HJE) y hoja más joven con mancha (HJM).

Factor	p-valor			
	HT	HF	HJE	HJM
Tratamiento	0,000	0,000	0,452	0,000
Evaluación	0,000	0,000	0,000	0,000
Interacción	0,082	0,001	0,000	0,001

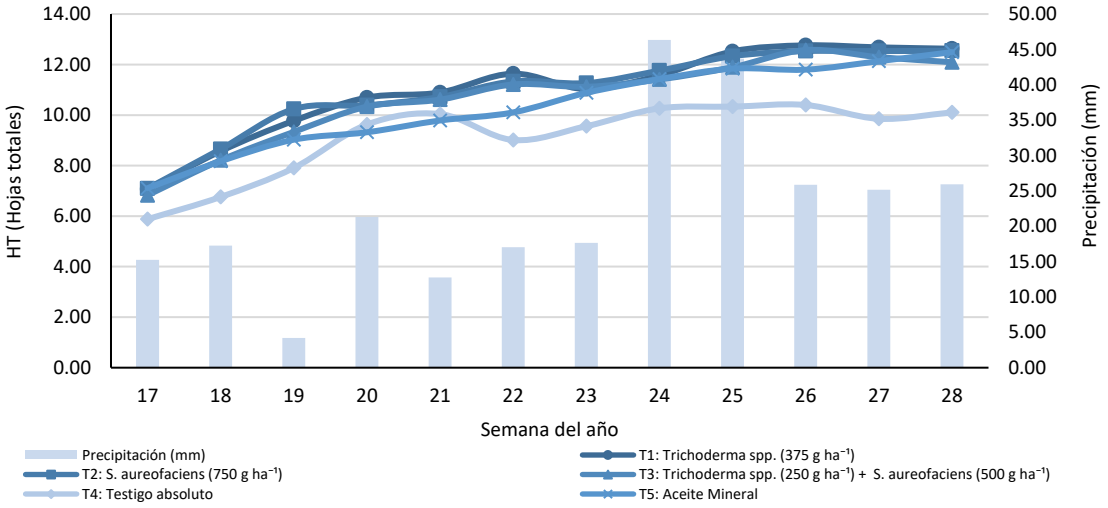
Cuadro 2. Agrupación estadística de medias para variables foliares según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) y medida promedio de la variable respuesta para los tratamientos *Trichoderma* spp. (375 g ha^{-1}) (tratamiento 1), *S. aureofaciens* (750 g ha^{-1}) (tratamiento 2), combinado de ambos productos (250 + 500 g ha^{-1}, respectivamente) (tratamiento 3) testigo absoluto (tratamiento 4) y testigo con aceite mineral (tratamiento 5) para cada variable medida.

Tratamiento	HT		HF		HJM		HJE
1	10,99 ± 1,80	A	10,02 ± 1,40	A	7,02 ± 0,53	A	3,94 ± 1,42
2	10,95 ± 1,68	A	10,02 ± 1,25	A	7,16 ± 0,59	A	4,00 ± 1,20
3	10,66 ± 1,72	AB	9,86 ± 1,34	AB	7,28 ± 0,53	A	3,96 ± 1,34
4	9,15 ± 1,57	C	7,96 ± 1,04	C	5,66 ± 0,61	C	3,91 ± 1,09
5	10,34 ± 1,71	B	9,57 ± 1,33	B	6,49 ± 0,83	B	3,90 ± 0,41

En conjunto, los resultados demuestran que los tratamientos con biocontroladores ejercieron un efecto regulador significativo sobre el desarrollo de la Sigatoka negra, reflejado en valores superiores de hojas totales, hojas funcionales y hoja más joven con mancha en comparación con el testigo absoluto y el tratamiento con aceite mineral. En particular, los tratamientos biológicos presentaron incrementos de al menos 1,5 hojas totales, entre 1,9 y 2 hojas funcionales, y ventajas de 1,3 a 1,6 hojas en HJM respecto a los testigos (Figura 1 A-C, Figura 2). El tratamiento con aceite mineral mostró un efecto intermedio, superando al testigo absoluto, pero sin alcanzar la eficacia de los tratamientos biológicos.

El aumento de superficie foliar responde al efecto bioestimulante de ambos microorganismos, lo cual constituye un parámetro de alto valor para la industria bananera, dado que un mayor número de hojas funcionales durante el periodo de llenado del fruto se asocia con una mejor calidad de racimo y una mayor proporción de frutos exportables (Ríos *et al*., 2021).

A


14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
HT (Hojas totales)
50.00
45.00
40.00
35.00
30.00
25.00
20.00
15.00
10.00
5.00
0.00
Precipitación (mm)
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
Semana del año
Precipitación (mm)
T1: Trichoderma spp. (375 g ha⁻¹)
T2: S. aureofaciens (750 g ha⁻¹)
T3: Trichoderma spp. (250 g ha⁻¹) + S. aureofaciens (500 g ha⁻¹)
T4: Testigo absoluto
T5: Aceite Mineral

B

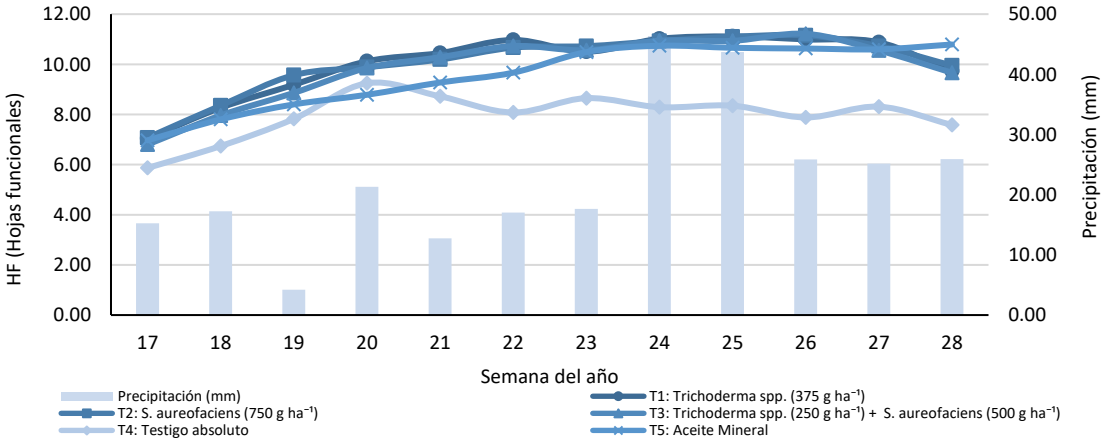

12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
HF (Hojas funcionales)
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
0.00
Precipitación (mm)
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
Semana del año
Precipitación (mm)
T1: Trichoderma spp. (375 g ha⁻¹)
T2: S. aureofaciens (750 g ha⁻¹)
T3: Trichoderma spp. (250 g ha⁻¹) + S. aureofaciens (500 g ha⁻¹)
T4: Testigo absoluto
T5: Aceite Mineral



Figura 1. Evolución temporal de variables foliares en plantas de banano tratadas con diferentes biocontroladores: A. Hojas totales, B. Hojas funcionales C. Hoja más joven con estría y D. Hoja más joven con mancha.

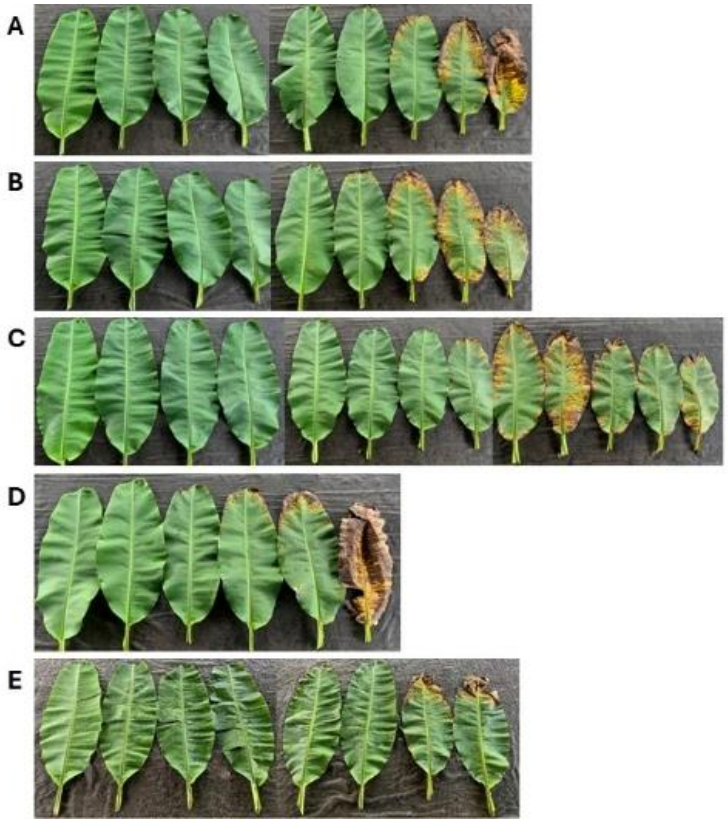


Figura 2. Recuento de hojas totales, hojas funcionales, hojas con estría y hojas con mancha para los tratamientos: A. a base de *Trichoderma* spp. (375 g ha^{-1}), B. a base de *S. aureofaciens* (750 g ha^{-1}), C. combinado de ambos productos (250 + 500 g ha^{-1}, respectivamente), D. testigo absoluto y E. testigo con aceite mineral.

Altura de la planta y circunferencia del pseudotallo

Se ha documentado que *Trichoderma* spp., además de su capacidad de biocontrol, posee un notable potencial bioestimulante. Este hongo es capaz de inducir respuestas de defensa en la planta que la protegen contra estreses abióticos, a la vez que mejora significativamente la absorción de nutrientes, la eficiencia fotosintética y el desarrollo general del cultivo (Jin & Alberti, 2025). Este efecto dual sugiere que las mejoras observadas en el estado fitosanitario no se limitan a la supresión del patógeno, sino que también responden a un mayor vigor y resiliencia de la planta, lo que resulta en una menor susceptibilidad al ataque de la Sigatoka negra.

El análisis de varianza para la altura de la planta reveló efectos significativos para los factores tratamiento y evaluación ($p \leq 0,05$), pero no para su interacción ($p > 0,05$) (Cuadro 3)., estableciéndose tres grupos estadísticos de desempeño (Cuadro 4). En la evaluación final, los tratamientos individuales de *Trichoderma* spp. y *S. aureofaciens*

registraron las mayores alturas, superando al testigo absoluto en 25,60 cm y 16,20 cm respectivamente, mientras que la combinación mostró una ventaja de 10,27 cm (Figura 4). Esta jerarquía de efectividad se mantuvo constante a lo largo de todo el ciclo, demostrando la superioridad de las aplicaciones individuales.

En contraste, para la circunferencia del pseudotallo, los tres tratamientos de biocontrol produjeron plantas significativamente más robustas que el testigo absoluto, sin diferencias estadísticas entre ellos (Cuadro 3, Cuadro 4). En la evaluación final, el tratamiento con *Trichoderma* spp. registró una circunferencia 5,13 cm mayor que el testigo absoluto, seguido por *S. aureofaciens* con 3,93 cm y la combinación con 1,93 cm de ventaja. Estos resultados demuestran el marcado efecto bioestimulante de los productos, el cual se tradujo en un mayor desarrollo vegetativo, siendo este efecto particularmente notable en el grosor del pseudotallo.

Cuadro 3. Valores de p para los factores de altura de la planta y circunferencia del pseudotallo (cm).

Factor	p-valor	
	Altura de la planta	Circunferencia del pseudotallo
Tratamiento	0,000	0,000
Evaluación	0,000	0,000
Interacción	0,993	0,990

Cuadro 4. Agrupación estadística de medias para variables foliares según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) y medida promedio de la variable para los tratamientos *Trichoderma* (375 g ha^{-1}) (tratamiento 1), *S. aureofaciens* (750 g ha^{-1}) (tratamiento 2), combinado de ambos productos (250 + 500 g ha^{-1}, respectivamente) (tratamiento 3) y testigo absoluto (tratamiento 4) para cada variable medida.

Tratamiento	Altura de la planta		Circunferencia del pseudotallo	
1	93,96 ± 35,60	A	26,22 ± 9,57	A
2	91,04 ± 30,51	AB	26,08 ± 8,74	A
3	87,52 ± 29,53	BC	25,43 ± 8,42	A
4	82,64 ± 26,27	C	23,85 ± 7,43	B

Dicho efecto bioestimulante, logrado mediante aplicaciones foliares, coincide con la capacidad de estos microorganismos para generar señales sistémicas que modifican la rizosfera a distancia. Investigaciones con *Streptomyces* spp. han demostrado que su aplicación foliar puede inducir respuestas que remodelan las comunidades microbianas de la rizosfera, reclutando microorganismos benéficos

vinculados a la resistencia contra enfermedades y al metabolismo energético de las plantas (Sun *et al*., 2025). Esta modulación remota del microbioma radical podría explicar las mejoras en el desarrollo vegetativo observadas en el presente estudio, donde aún las aplicaciones dirigidas al follaje promovieron un mayor crecimiento en altura y circunferencia del pseudotallo.

De forma paralela, estudios han reportado que la aplicación foliar de formulaciones sólidas de *Trichoderma* spp. puede mejorar significativamente las condiciones de crecimiento de las plantas. Este mecanismo resulta particularmente efectivo durante etapas tempranas de desarrollo, cuando el sistema radicular no está completamente establecido y la absorción foliar se convierte en una vía eficiente para la asimilación de estímulos promotores del crecimiento (Syam *et al*., 2021). Este principio de eficiencia en la nutrición foliar durante fases de crecimiento activo podría extrapolarse a nuestros resultados en plantas de banano, donde las aplicaciones foliares de biocontroladores promovieron un mayor desarrollo vegetativo, posiblemente al complementar la nutrición de las plantas durante su etapa de establecimiento, a través de las hojas.

Promedio ponderado de infección

El incremento del riesgo de infección por Sigatoka negra en América Latina desde la década de 1960, asociado al cambio climático y al desarrollo de resistencia del patógeno frente a los fungicidas sintéticos, ha impulsado la necesidad de incorporar alternativas de manejo más sostenibles (Becker *et al.,* 2021). En este contexto, la solución planteada en el presente estudio representa una vía alternativa a la anterior problemática.

Al evaluar la eficacia de esta alternativa mediante el promedio ponderado de infección, el análisis de varianza reveló efectos significativos de los tratamientos, el tiempo de evaluación y de su interacción ($p \leq 0,05$) (Cuadro 5), lo que evidencia diferencias en la respuesta a la Sigatoka negra entre las estrategias de manejo evaluadas y su comportamiento diferencial a lo largo del ciclo del cultivo.

Cuadro 5. Valores de p para los factores del promedio ponderado de infección.

Factor	p-valor
Tratamiento	0,000
Evaluación	0,000
Interacción	0,000

Los resultados del Cuadro 6 muestran que el uso de aceite mineral genera un efecto protector al reducir el promedio ponderado de infección en comparación con el

testigo absoluto, lo cual es esperable debido a su acción física sobre la superficie foliar. Los tratamientos que incorporaron microorganismos presentaron una mayor reducción del promedio ponderado de infección en comparación con el aceite mineral, dentro de estos, la diferencia estadísticamente significativa respecto al aceite se observó únicamente en el tratamiento combinado de *Trichoderma* y *S. aureofaciens*, lo que sugiere un efecto sinérgico entre ambos microorganismos para el control de la Sigatoka negra, posiblemente asociado a la acción complementaria de sus mecanismos de control biológico.

Cuadro 6. Agrupación estadística de medias para la variable del promedio ponderado de infección según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) y medida promedio de la variable para los tratamientos Trichoderma (375 g ha^{-1}) (tratamiento 1), *S. aureofaciens* (750 g ha^{-1}) (tratamiento 2), combinado de ambos productos (250 + 500 g ha^{-1}, respectivamente) (tratamiento 3), testigo absoluto (tratamiento 4) y testigo con aceite mineral (tratamiento 5).

Tratamiento	Promedio ponderado de infección	
1	0,98 ± 0,06	B
2	0,93 ± 0,14	BC
3	0,84 ± 0,14	C
4	1,11 ± 0,12	A
5	1,03 ± 0,21	AB

La reducción en el PPI lograda por los biocontroladores resulta fisiológicamente crucial, ya que al preservar el área foliar fotosintéticamente activa —frente al daño que causa la Sigatoka negra en estados avanzados—, se mantiene la capacidad de desarrollo vegetativo (George *et al*., 2022). Sin embargo, la eficacia supresora se vio afectada por condiciones ambientales favorables al patógeno, observado tras el pico de precipitación (semana 26), en donde el incremento en la humedad promovió la esporulación y dispersión de *P. fijiensis* (Figura 3). Este evento intensificó la presión de inóculo y aceleró la progresión de la enfermedad, lo que se corrobora con la disminución simultánea en las variables de hoja más joven con mancha y estría (Figura 1 C-D).

Pese a la limitación en la persistencia hacia el final del ciclo, el efecto supresor inicial fue decisivo para sustentar el mayor desarrollo vegetativo registrado. Estos resultados destacan la necesidad de optimizar las estrategias de aplicación, recomendándose realizar ensayos en épocas de mayor precipitación para evaluar la resiliencia de los biocontroladores bajo condiciones de alta presión de inóculo, así como sumar estas alternativas dentro de un programa de manejo integrado de la

enfermedad más sostenible, cuyos objetivos sean disminuir la carga química, manejar la resistencia del patógeno y mejorar la calidad de racimo.

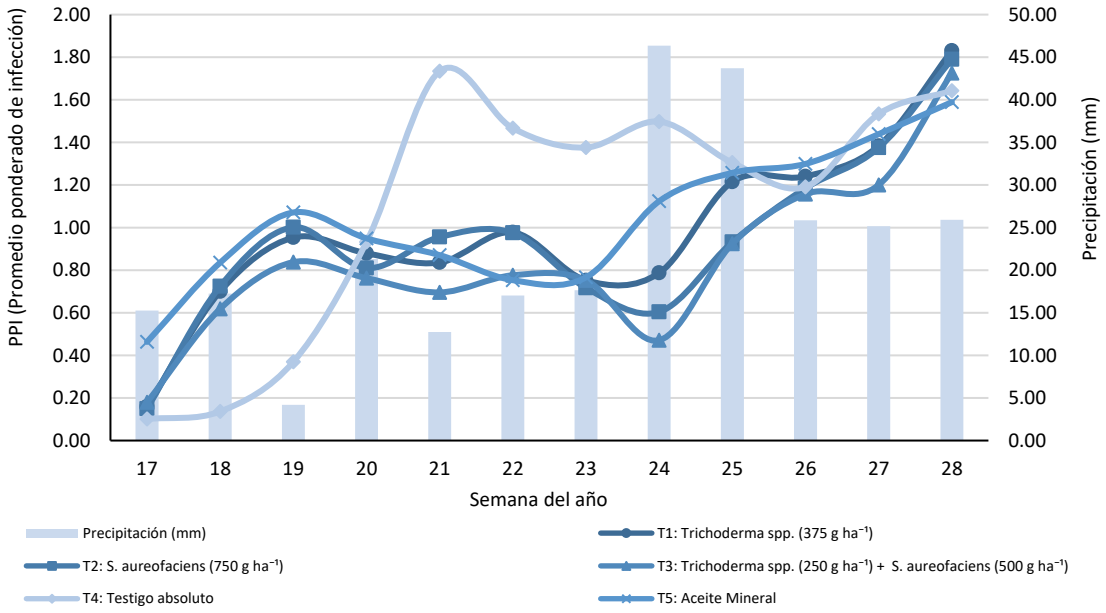


Figura 1. Evolución del Promedio Ponderado de Infección (PPI) y la precipitación semanal en plantas de banano bajo diferentes tratamientos de biocontrol.



Figura 2. Altura de la planta para los tratamientos: A. a base de *Trichoderma* spp. (375 g ha^{-1}), B. a base de *S. aureofaciens* (750 g ha^{-1}), C. combinado de ambos productos (250 + 500 g ha^{-1}, respectivamente) y D. testigo absoluto.

En conjunto, los resultados de este proyecto sugieren que la aplicación de microorganismos de biocontrol, como *Trichoderma* spp. y *Streptomyces* spp., constituye una estrategia biotecnológica prometedora para el manejo integrado de la Sigatoka negra en banano. La efectividad demostrada por ambos géneros, con sus distintos mecanismos de acción complementarios, sugiere que su uso conjunto o alternado puede potenciar el control de la enfermedad. Cabe resaltar que los dos géneros pertenecen al grupo BM 02 del FRAC, consecuentemente pueden ser utilizados sin limitaciones o restricciones respecto al número, momento y frecuencia de aplicaciones, siempre y cuando se sigan las recomendaciones de uso del fabricante y se cumpla con los requisitos regulatorios locales (Mehl *et al*., 2024).

CONCLUSIONES

Los biocontroladores a base de *Trichoderma* spp. y *S. aureofaciens* demostraron un control efectivo contra la Sigatoka negra, principalmente mediante la supresión de la expansión de lesiones, preservación y aumento del área foliar funcional.

Ambos microorganismos exhibieron un notable efecto bioestimulante, promoviendo significativamente el desarrollo vegetativo de la planta de banano.

La capacidad de estos biocontroladores para reducir la severidad de la enfermedad y estimular el crecimiento vegetativo, junto con su acción sistémica mediante aplicaciones foliares, los posiciona como alternativas sostenibles para el manejo integrado en el cultivo de banano.

Se recomienda que futuros ensayos incluyan testigos comerciales y la evaluación de dosis mayores de los biocontroladores, con el fin de comparar su desempeño bajo condiciones más exigentes y optimizar las estrategias de manejo para el control de la Sigatoka negra en el cultivo de banano.

REFERENCIAS

Becker P, Esker P and Umaña G. 2021. Incorporation of microorganisms to reduce chemical fungicide usage in black sigatoka control programs in Costa Rica by use of biological fungicides. Crop Protection 146:105657.

Carlier J, Robert S, Roussel V, Chilin-Charles Y, Lubin-Adjanoh N, Gilabert A and Abadie C. 2021. Central American and Caribbean population history of the *Pseudocercospora fijiensis* fungus responsible for the latest worldwide pandemics on banana. Fungal Genetics and Biology 148:103528.

George M, Cherian KA and Mathew D. 2022. Symptomatology of Sigatoka leaf spot disease in banana landraces and identification of its pathogen as *Mycosphaerella eumusae*. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 21.

Issara U, Chotiko A, Phothisuwan S, Kraithong S and Rungraeng N. 2024. Banana peels: Identification, quantification, and characterization. In Banana Peels Valorization. Academic Press, pp. 1-35.

Jin S and Alberti F. 2025. Advances in the discovery and study of *Trichoderma* natural products for biological control applications. Natural Product Reports 42.

Marín Vargas D and Romero Calderón R. 1992. El combate de la Sigatoka negra. CORBANA boletín N°4, p. 104.

Mehl A, Rubio D, Granja R, Donoso Cajas E, Medina R, Corcolon BM, Catambacan D, Arcia Hoyos A, Avila D, Jaramillo G, Martin-Grand-Mazuir A, Simoes, Chamorro, D, Fersenth Leon H, Mosquera T, Pinzón AM, Marín D, Blanco MV, Ayuso F, *et al*. 2024. FRAC Guidelines for Banana (Minutes of the Banana FRAC Working Group). Mérida, México.

Ríos EML, Guerrero JNQ and Batista RMG. 2021. Drench: Evaluación de aplicaciones mensuales de soluciones nutritivas en banano (*Musa* X *paradisiaca* l.) y sus efectos en la producción y calidad de fruto. Revista Científica Agroecosistemas 9.

Sun M, Han C, Meng X, Zeng R, Wang X, Yan G, Zheng F and Zhu C. 2025. Biocontrol potential of *Streptomyces alboflavus* LNU-CPARS28 against tomato gray mold caused by *Botrytis cinerea*. Physiological and Molecular Plant Pathology 140:102949.

Syam N, Hidrawati Sabahannur St. and Nurdin A. 2021. Effects of Trichoderma and Foliar Fertilizer on the Vegetative Growth of Black Pepper (*Piper nigrum* L.) Seedlings. International Journal of Agronomy 2021.

Torres Nazari M, Analise Schommer V, Arenhart Braun JC, Franco dos Santos L, Teixeira Lopes S, Simon V, Strieder Machado B, Ferrari V, Colla LM and Steffanello Piccin J. 2023. Using Streptomyces spp. as plant growth promoters and biocontrol agents. Rhizosphere 27:100741.

Zeng H, Li Wu Y, Xu L, Dong J and Bingzhi H. 2024. Banana defense response against pathogens: Breeding disease-resistant cultivars. Horticultural Plant Journal.