



**Memorias de la  
Reunión  
Internacional  
XXV Acorbat  
X Corbana 2026**



**Divulgación  
en Plátanos  
y Bananos**

**Volumen 3 • Número 1  
Enero - Junio, 2026**

**Volumen 3 • Número 1, 2026  
Enero-Junio 2026**

*Revista de Tecnología y Ciencia / Journal of Technology and Science*  
**Acorbat**

**XXV REUNIÓN INTERNACIONAL DE ACORBAT / X REUNIÓN CORBANA**

20 al 23 de abril, 2026  
Mérida, Yucatán, México

**JUNTA DIRECTIVA INTERNACIONAL DE ACORBAT**

Román Gómez Vaillard, Presidente  
Rafael Segura Mena, Vicepresidente  
Jaiver Danilo Sánchez, Secretario  
Mildred Cortés, Tesorero  
Sergio Luis Rodríguez Donato, Vocal  
Jorge Eliecer Hernández Rendón, Revisor Fiscal

**CORPORACIÓN BANANERA NACIONAL DE COSTA RICA (CORBANA)**

Marcial A. Chaverri Rojas, Gerente General  
Danilo Bernardo R., Presidente  
Francisco Muñoz V., Vicepresidente  
Jorge Acón S., Tesorero  
Mahity Flores F., Secretaria  
Marvin Arias A., Vocal

**Editores Adjuntos Volumen 3, Número 1. Enero-Junio 2026**

**COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL**

Dr. Mario Orozco Santos, INIFAP, México  
M.C. Sebastian Zapata Henao, Uniban, Colombia  
Dr. Daniel Gerardo Cayón Salinas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia  
Dr. Jorge A. Sandoval Fernández, Consultor Internacional, Costa Rica  
M.C. Mauricio Guzmán Quesada, Cropland Biosciences, Costa Rica  
Dr. Luc De Lapeyre De Bellaire, CIRAD, Francia  
Dr. Miguel Ángel Dita Rodríguez, Consultor Internacional, Brasil

**COMITÉ CIENTÍFICO LOCAL**

Dr. Rafael Segura Mena, CORBANA, Costa Rica  
MSc. Erick Bolaños, CORBANA, Costa Rica  
Dra. Nancy Chaves, CORBANA, Costa Rica  
MSc. Roy Arce, CORBANA, Costa Rica  
Dr. Ronald Romero, Consultor, Costa Rica  
Dr. Miguel Muñoz, Dole - Standard Fruit Company, Costa Rica

**EDITORES**

Dr. Mario Orozco Santos, INIFAP, Méx. Editor en Jefe  
Dr. Gustavo Mora Aguilera, CP-LANREF, Méx., Editor Técnico  
M.C. Irma Azucena Zamora Gallegos, CP-LANREF, Méx., Gestión Editorial

**COMPOSICIÓN WEB**

M.C. Eduardo Guzmán Hernández, CP-LANREF, Méx.  
M.C. Oscar Eder Flores Colorado, CP-LANREF, Méx.

## ÍNDICE

La Sigatoka negra del banano: ¿una batalla sin fin?	1
Réduction des pesticides en banane: les trajectoires du changement	8
Systems-based management of black Sigatoka in the French West Indies	17
Control of black leaf streak disease without mancozeb in commercial plantations of Colombia	26
Eficacia del fungicida biorracional BS6 como alternativa para mancozeb en programas para control de Sigatoka negra ( <i>Pseudocercospora fijiensis</i> )	37
Eficacia biológica del manejo de Sigatoka negra ( <i>Pseudocercospora fijiensis</i> ) con <i>Trichoderma</i> spp. y <i>Streptomyces aureofaciens</i> bajo condiciones de campo	43
Compatibilidad funcional de extractos alcalino-atmosféricos de <i>Ascophyllum nodosum</i> canadiense con fungicidas utilizados en el control de <i>Pseudocercospora fijiensis</i> ( <i>Mycosphaerella fijiensis</i> )	59
Evaluación del coadyuvante Exxsol™ D145 con una baja concentración de surfactantes sobre la eficacia de fungicidas en cultivos de plátano	68
Tecnología Leci-Tech para mejorar la eficiencia de los fungicidas en Sigatoka Negra ( <i>Pseudocercospora fijiensis</i> ) en el cultivo de banano	76
Deriva de fitosanitarios en plantaciones de banano ( <i>Musa</i> AAA) aplicados con un vehículo aéreo no tripulado con capacidad mayor a 20 litros	84
Acciones que implementa el Gobierno de México para prevenir el ingreso de la Marchitez por Fusarium-Foc R4T	91
Coexistiendo con Fusarium R4T, Moko y el virus del Bunchy Top: 20 años del Caso Filipino	98
Evaluación <i>in vitro</i> de productos biorracionales sobre el crecimiento de la raza 1 de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i>	106
Biocontrol potential of the <i>Cryphonectria hypovirus</i> 1 (CHV1) against <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> race 1	113
Filogenómica como herramienta clave para la detección y respuesta temprana ante <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> raza 4 Tropical	121
Producción de banano libre de nematocidas: rol de ensilados con microbiota nativa en el manejo integral de nematodos	127
Eficacia de <i>Purpureocillium lilacinum</i> y <i>Pochonia chlamydosporia</i> en el manejo del nemátodo <i>Radopholus similis</i> en el cultivo de banano	137
Tecnología innovadora para el control de las poblaciones de nematodos fitopatógenos en el cultivo de banano ( <i>Musa paradisiaca</i> L.)	147

Vectorialidad del picudo negro ( <i>Cosmopolites sordidus</i> ) en la transmisión de <i>Ralstonia solanacearum</i> raza 2 en banano Cavendish ( <i>Musa AAA</i> )	157
Impacto de la erradicación con metam-sodio y urea sobre <i>Ralstonia solanacearum</i> y la salud del suelo en banano – Finca comercial Universidad EARTH	168
Bacterias nativas antagonistas de <i>Ralstonia solanacearum</i> raza 2 agente causal del Moko en banano	176
Etiological agents of crown rot disease in Cavendish bananas in Colombia	184
Estrategias alternativas para el control de la pudrición suave del fruto: antagonismo y modificaciones al embolse	192
Uso de bioherbicidas como alternativa al glifosato para el control de maleza en banano	200
Securing the future of Cavendish through precision gene editing	207
Diversidad genómica de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> Raza 1 en Costa Rica	215
De las ómicas al campo: inducción de defensa en banano frente a <i>Pseudocercospora fijiensis</i>	224
La création de nouvelles variétés de bananes multi-résistantes pour augmenter la diversité variétale et éviter l'usage de pesticides	232
Potencial reproductivo de diploides mejorados ( <i>Musa AA</i> ) bajo trópico húmedo para el mejoramiento genético convencional del subgrupo Cavendish	242
Selection-based breeding for the development of low-stature, fast, heavy-bunch banana cultivars	249
TR4-Resistant Bananas: securing the future of the banana Industry	257
Innovative banana improvement at rahan meristem: addressing tr4, Black Sigatoka and climate change	265
Respuesta de plántulas de banano en vivero a dosis de vermicompost en el sustrato	272
Development of a fertilization recommendation for banana in the State of São Paulo, Brazil: steps toward sustainability	285
Valores de referencia y normas CND para evaluación nutricional de banano ‘Prata-Anã’ en ambiente semiárido	293
Diagnóstico de la calidad del suelo en dos condiciones de producción de banano y un bosque secundario de Costa Rica	300
Desarrollo de una aplicación móvil para el cálculo de índices de calidad de suelo en banano	309
Dinámica en la producción de biomasa del plátano por enmiendas de biocarbón, biopolímeros y micorrizas en un suelo Oxisol	316
Caracterización histológica de la etapa reproductiva del banano y su relación con desórdenes fisiológicos del racimo	324

Efecto de bio estimulantes en la reducción de estrés y aumento del peso de racimos en el cultivo de banano	332
Tecnología en la postcosecha del Banano: más productividad, menos costos	340
Blockchain, transparencia y creación de valor en cadenas agroalimentarias	349
Panorama mundial de la cadena del banano: evolución del comercio internacional y desafíos estructurales del sector	355
Marché mondial de la banane: le futur du secteur n'est pas dans une simple adaptation aux changements	363
Caracterización socio-agronómica de fincas plataneras en la provincia de Limon, Costa Rica	373
Modelo de extensión y transferencia de tecnología de la Corporación Bananera Nacional para productores de banano de exportación	383
CORBANA-COSTA RICA: 45 años de Investigación y Transferencia	390
La conquista digital del banano latinoamericano: un vuelo entre la innovación de la inteligencia artificial y el laberinto jurídico. ¿preparada la región para el futuro?	398

## La Sigatoka negra del banano: ¿una batalla sin fin?

Ronald A. Romero<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Fitopatólogo, PhD, investigador independiente. Costa Rica.

**\*Autor de correspondencia:**

Ronald A. Romero  
ronona27@gmail.com

**Contribución:**

Nota de Investigación

**Sección:**

Fitosanidad

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Romero RA. 2026. La Sigatoka  
negra del banano: ¿una batalla  
sin fin? *Acorbat Revista de  
Tecnología y Ciencia* 3(1): 103  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26103>

### RESUMEN

En este artículo se analizan las tendencias en los factores que influyen en el control integrado de la Sigatoka negra del banano Cavendish en los principales países de exportación. El desarrollo de resistencia a fungicidas en *Pseudocercospora fijiensis*, la no renovación de la aprobación regulatoria, más una ralentización en el desarrollo de nuevos modos de acción está reduciendo la disponibilidad de fungicidas para controlar la Sigatoka negra. En regiones de clima muy favorable a la enfermedad, esta condición está provocando un incremento significativo en los niveles de infección con impactos importantes en los rendimientos. Bajo estas condiciones, es necesario buscar alternativas de manejo del cultivo que permitan un mejor control de la enfermedad, mientras se desarrollan variedades resistentes.

**Palabras clave:** Sigatoka negra, *Pseudocercospora fijiensis*, Cavendish

### ABSTRACT

This article discusses trends in factors influencing the integrated control of black Sigatoka disease in major Cavendish banana exporting countries. The development of fungicide resistance in *Pseudocercospora fijiensis*, the non-renewal of regulatory approval, plus a slowdown in the development of new modes of action is reducing the availability of fungicides to control black Sigatoka. In regions with a climate that is very favorable to the disease, this condition is causing a significant increase in infection levels with important impacts on yields. Under these conditions, it is necessary to look for crop management alternatives that allow better control of the disease, while developing resistant varieties.

**Keywords:** Sigatoka negra, *Pseudocercospora fijiensis*, Cavendish



## INTRODUCCIÓN

La enfermedad de la Sigatoka negra (SN), causada por el hongo *Pseudocercospora fijiensis*, antes *Mycosphaerella fijiensis*, continúa siendo la enfermedad foliar más destructiva del banano y plátanos a nivel mundial, afectando la fotosíntesis de las plantas y causando una disminución significativa del peso de los racimos. Adicionalmente, una alta infección en las hojas acelera la maduración de los frutos durante el transporte a los mercados. En las fincas de producción de Cavendish para exportación, el costo del control de la SN representa uno de los rubros más altos del costo total de cultivo.

Este artículo tiene el objetivo de examinar cuáles factores están generando tendencias retadoras en el control de la SN en bananos Cavendish para exportación, y a la vez explorar las posibilidades de mantener a futuro un control satisfactorio y sostenible de una de las enfermedades de cultivo de mayor impacto a nivel mundial.

### Experiencia en el control de la Sigatoka negra en Cavendish

Antes de iniciar el análisis de los factores que han influido y continúan influyendo en el control integral de la SN, es necesario revisar brevemente el marco de tiempo dentro del que se sitúa este breve análisis. En el control de la SN se tienen entre 10 años en el Caribe, y más de 35 años en la mayoría de los restantes países productores de banano para exportación. Después de un periodo tan prolongado, la cuestión obvia es si, en este tiempo, hemos avanzado hacia un control más efectivo y sostenible o si, por el contrario, estamos experimentando un retroceso, o si existen limitaciones en el combate de la SN que puedan representar amenazas serias a la producción del Cavendish hacia futuro.

### Tendencias en el uso de fungicidas:

En la literatura existe información sobre la evolución del uso de fungicidas para el control de la Sigatoka negra. Al principio, se utilizaron fungicidas multi-sitio y aceite agrícola, lo cual fue dando paso a la introducción de fungicidas de sitio específico, con actividad dentro de las hojas.

El patrón de uso de fungicidas en banano Cavendish es muy similar al de otros cultivos con enfermedades de alta importancia económica, como la roña del manzano y la podredumbre gris de la uva. El desarrollo de fungicidas con diferente modo de acción en estos más de 35 años de control ha permitido el manejo de poblaciones resistentes a fungicidas en *P. fijiensis*.

No obstante, *P. fijiensis* ha demostrado una enorme capacidad adaptativa para desarrollar resistencia múltiple, esto es, resistencia a fungicidas sistémicos de

diferentes modos de acción, tales como los triazoles, los benzimidazoles, las estrobilurinas y las piridin-carboxamidas. No existen investigaciones respecto al mecanismo de resistencia a múltiples modos de acción en *P. fijiensis*, pero en otros patógenos se ha identificado asociada a una combinación de mutaciones genéticas acumuladas a través del tiempo. También, se podría sospechar de la existencia de resistencia múltiple a fármacos (multiple-drug resistance), un término utilizado para describir un mecanismo activo de detoxificación celular desarrollado por las células, y reportado en hongos fitopatógenos, que afecta la actividad de varios fungicidas.

La repercusión práctica del desarrollo de resistencia a fungicidas está generando mayores dificultades de controlar la enfermedad, con una magnitud mucho mayor en aquellas condiciones de climas lluviosos donde se dan más ciclos reproductivos del patógeno por año y los niveles de inóculo permanecen normalmente altos. Bajo estas condiciones de clima muy favorables a la enfermedad, el uso de fungicidas sistémicos de alta eficacia es absolutamente necesario para lograr un control adecuado, debido a la mayor cantidad de infecciones que escapan la actividad de los fungicidas protectores, aun cuando se apliquen a intervalos muy cortos.

El desarrollo de resistencia a fungicidas en *P. fijiensis* ha sido reportado en prácticamente todos los países de producción de Cavendish para exportación, produciendo el mismo resultado: retiro de fungicidas, como en el caso de benomil y azoxistrobina, incremento en el número de tratamientos de fungicidas protectores, reducción del intervalo de las aplicaciones de algunos fungicidas sistémicos con algún grado de eficacia, incrementos en las dosis de aceite, y mayor uso de mezclas para poder controlar las poblaciones de *P. fijiensis* resistentes. La cantidad de ciclos de fungicidas aplicados por año para el control de la Sigatoka se ha duplicado, y hasta triplicado con relación al número de aplicaciones utilizadas antes del desarrollo de la resistencia a fungicidas, con un alto impacto sobre el costo de control. En Costa Rica, de 1985 a 1994 se reporta un costo promedio de US\$833 por hectárea por año, mientras que para el 2015, el costo promedio estaba en US \$1837/ha/año. En los dos últimos años, 2024 y 2025, las condiciones de clima en Costa Rica produjeron incrementos muy altos en los niveles de severidad de la SN en algunas zonas, resultando en un mayor número de aplicaciones y un mayor costo de control.

Incrementos en el costo de control de la SN desde su establecimiento y hasta la fecha, con igual o diferente magnitud, se han dado en varios países, en todas las regiones de producción de bananos Cavendish para exportación, causados por cambios en las estrategias de uso de mayor número de fungicidas protectores, y por el fenómeno de resistencia a fungicidas.

La combinación del desarrollo de resistencia a fungicidas y las limitaciones regulatorias están produciendo una reducción en el número de fungicidas disponibles para el control de esta enfermedad, con potenciales implicaciones negativas para la industria.

### **El clima**

La precipitación es el factor de clima al que normalmente se pone más atención y que se asocia con relativa facilidad con los cambios en la incidencia de SN. No obstante, entre el 2023 y el 2025 se dieron condiciones de temperaturas promedios más altas de lo normal en varios países de Centro América, que se extendieron por varios meses consecutivos, y con condiciones de lluvia alternándose con periodos secos de varios días. La temperatura promedio subió entre 1 y 2 °C. Esto provocó un aumento en la velocidad del desarrollo de las infecciones y así en la producción de inóculo al acortar el ciclo de vida del hongo, es decir, más ciclos de reproducción sexual y de esporulación. Con ese incremento desmesurado en los niveles de inóculo y la presencia de una alta frecuencia de cepas resistentes a fungicidas, el control de la enfermedad se complicó considerablemente. Esta situación ocurrió de manera clara en la parte norte y en menor grado en fincas ubicadas hacia el centro del Caribe de Costa Rica.

### **Prácticas culturales**

Hay tres objetivos básicos con las prácticas agrícolas como complemento al control químico: reducir las condiciones de humedad dentro de la plantación, reducir los niveles de inóculo interno y evitar las pérdidas de racimos enteros con una cosecha a menor edad.

La contribución relativa de las prácticas culturales en el control de la SN se incrementa conforme se favorecen las condiciones de clima para la enfermedad y con el avance del desarrollo de la resistencia a los fungicidas. En general, no se han experimentado cambios significativos en las prácticas culturales en el control de la SN en los últimos años.

### **Métodos de aplicación de fungicidas**

Los métodos de aplicación de fungicidas han tenido pocos cambios, excepto la introducción de los drones, que pueden acceder a algunas áreas de las fincas difíciles de aplicar con aviones o helicópteros, o en zonas de amortiguamiento.

### **Resistencia genética en bananos Cavendish**

Actualmente no existe una variedad Cavendish con resistencia a la Sigatoka negra. En un trabajo pionero en modificación genética, en la década de 2000 a 2010,

se logró desarrollar una línea con resistencia parcial, sin embargo, la variedad presentó variaciones negativas importantes a nivel morfológico y de rendimientos. El resultado, no obstante, mostró que es posible lograr resistencia transgénica a la SN. Desafortunadamente, la oposición pública y de gobiernos a la transformación genética ha desestimulado significativamente el desarrollo de variedades Cavendish resistentes a la Sigatoka negra, algo que parece estar cambiando con la edición genética.

En otros grupos de bananos no pertenecientes a los Cavendish ni al Gros Michel, y en los plátanos, ha sido posible desarrollar variedades con niveles de resistencia variables a la SN negra, por varios programas de mejoramiento existentes en varios países y regiones a nivel mundial (FHIA, IITA, EMBRAPA, CIRAD), que han contribuido significativamente con sostener un suministro de alimentos a poblaciones locales de varios países altamente dependientes de plátanos en su dieta. La aceptación de las variedades de bananos no Cavendish resistentes a la Sigatoka negra en los principales mercados internacionales ha sido prácticamente nula.

La dispersión de la enfermedad de la marchitez de *Fusarium*, raza 4 tropical (R4T), en los países productores de Cavendish, añade un reto adicional al control por medio de resistencia genética, ya que, en presencia de R4T, una variedad resistente a la SN debe ser también resistente a la R4T.

### **El sistema de cultivo del banano Cavendish**

La producción de bananos Cavendish para exportación es un sistema muy eficiente para suministrar el producto a los mercados de manera ininterrumpida todas las semanas durante todo el año, sin necesidad de sembrar los lotes de producción de manera frecuente. En un día cualquiera, y durante cualquier época del año, en la producción tradicional de bananos encontramos plantas, madres e hijos en crecimiento vegetativo, en todas las alturas posibles, más las plantas con fruto en diferentes etapas de desarrollo. Bajo esta condición, tanto la intensidad de la enfermedad, como la tasa de progreso de esta varía según el estado de desarrollo de las plantas; se puede decir que existen varias epidemias en diferentes estadios de desarrollo al mismo tiempo, lo que dificulta drásticamente el control de la SN.

En contraposición a esto, en los sistemas de cultivo de ciclo corto, o anuales, se tienen crecimientos vegetativos homogéneos, un solo periodo de floración y de cosecha, que favorecen la sincronización de los tratamientos fungicidas en estadios críticos de la epidemia. Además, permiten una ruptura del ciclo de vida del hongo posterior a la cosecha. En algunos países bananeros con suelos poco profundos y de baja fertilidad (por ejemplo, en Costa de Marfil, Guadalupe y Martinica), es necesario

renovar las plantaciones cada cierto número de años y ello hace que las plantas tiendan a crecer de manera más sincronizada por varias cosechas.

En la producción de banano Cavendish para exportación de América Latina, el sistema de producción anual se ha utilizado comercialmente en varias compañías comercializadoras y por productores locales, sin embargo, la proporción de área en este tipo de producción es todavía muy pequeña en comparación con el método tradicional, por las diferencias en rendimiento en favor de las siembras tradicionales. No obstante, debido al desarrollo de resistencia generalizada a los fungicidas sistémicos en *P. fijiensis*, principalmente en las áreas de clima muy favorable a la enfermedad, la producción anual de banano Cavendish podría ayudar a disminuir las pérdidas de rendimientos y obtener costos de producción más bajos que manteniendo el sistema tradicional de producción.

### **Perspectivas a futuro**

El desarrollo de plantas resistentes de Cavendish es la alternativa más efectiva para mejorar el control sostenible de la Sigatoka negra, ya sea por transformación genética o por edición genética, en un cultivo en el que los riesgos ecológicos y de salud de estas tecnologías son bajos en comparación con la tendencia actual de continuar aumentando la cantidad de aplicaciones de fungicidas. Como se expresó con anterioridad, la presencia de R4T en varios países bananeros conlleva el reto de que una variedad de banano con resistencia a la SN debe también tener resistencia al R4T, lo cual agrega un nivel de complejidad mayor a este objetivo.

El uso de tecnologías de mejoramiento tradicionales puede producir plantas con resistencia a la SN en otras variedades de banano, lo más retador en estas variedades es lograr las características de postcosecha y de sabor que sean aceptables para los consumidores.

De acuerdo con la tendencia observada en los últimos 10 años, las probabilidades de desarrollo de fungicidas con nuevos modos de acción y altamente eficaces contra la SN, que hagan una diferencia notable en el control, parecen ser bajas. No obstante, varias compañías de agroquímicos están trabajando en áreas novedosas para desarrollar alternativas de fungicidas con el fin de atacar el creciente desarrollo de resistencia y para reemplazar fungicidas que están perdiendo las aprobaciones regulatorias. Se pueden citar algunos ejemplos de estos, tales como el flufenoxadiazam, un inhibidor de la histona deacetilasa (HDAC) que interfiere con la expresión de genes fúngicos, el flumetylsulfonilamida, clasificado dentro de un nuevo grupo por su modo de acción y que actúa sobre el metabolismo de los ácidos nucleicos, fungicidas basados en interferencia de RNA y doble cadena de RNA (RNAi/dsRNA),

para la inducción de silenciamiento de genes por aspersiones (SIGS en inglés), evitando la infección o su desarrollo.

Bajo estas perspectivas, y principalmente para aquellas regiones con condiciones de clima muy favorables a la enfermedad y donde la eficacia de los fungicidas se ha visto significativamente afectada por el desarrollo de resistencia, parece sensato pensar en alternativas de sistemas de producción que permitan un mucho mejor manejo del inóculo, limitando los ciclos de reproducción sexual del hongo, y una mejor sincronización de la aplicación de fungicidas. Este sistema de producción anual podría tener implicaciones en el manejo del R4T con variedades susceptibles o con variantes soma clonales de Cavendish con algún nivel de resistencia al R4T.

## REFERENCIAS

- Aguilar-Barragan A, García-Torres AE, Odriozola-Casas O, Macedo-Raygoza G, Ogura T, Manzo-Sánchez G, James AC, Islas-Flores I, Beltrán-García MJ. 2014. Chemical management in fungicide sensitivity of *Mycosphaerella fijiensis* collected from banana fields in México. *Brazilian Journal of Microbiology* May 19; 45(1) :359-64.
- de Lepeyre de Bellaire L, Foure E, Abadie C and Carlier J. 2010. Black leaf streak disease is challenging the banana industry. *Fruits* 65, 327-42
- de Lepeyre de Bellaire L, Roussel VV, Guillermet C and Le Guen R. 2015. Evaluation de la résistance aux fongicides des populations *M. fijiensis*, agent de la MRN dans la Caraïbe. *In: Programme Interreg Caraïbes. Poste 3. Recherche et développement. Rapport annuel d'activités du Cirad 2014. WP2-Echanges d'informations avec les partenaires du Project et transfert de savoir-faire en appui au développement de systems de culture innovants. CIRAD, Montpellier, France.*
- FRAC. 2024. Banana Working Group Minutes. Mérida. México. [www.frac.info](http://www.frac.info).
- Ganry J, Fouré, de Lapeyre de Bellaire L and Lescot T. 2011. An integrated approach to control the black leaf streak disease (BLSD) of bananas, while reducing fungicide use and environmental impact. *In: Dhanasekaran, D., Thajuddin, N. and Paneerselvam, A. (Eds.) Fungicides for Plant and Animal Diseases. InTech, Rijeka, Croatia, pp. 193-226.*
- Martínez-Bolaños L, Téliz-Ortiz D, Rodríguez-Maciel JC, Mora-Aguilera JA, Nieto-Ángel D, Cortés-Flores, JI, Mejía-Sánchez D, Nava-Díaz C and Silva-Aguayo, G. 2012. Fungicides resistance on *Mycosphaerella fijiensis* populations of southeastern 46, Mexico. *Agrociencia* 707-717.
- Romero RA, Pérez-Vicente L and Guzmán M. 2019. Chemical Control. *In: D. R. Jones (Ed.), Handbook of diseases of banana, abaca and enset. CABI International. UK.*
- Sepúlveda L. 2015. Caracterización fenotípica de *Mycosphaerella fijiensis* y su relación con la sensibilidad a fungicidas en Colombia. *Revista Mexicana de Fitopatología* 34(1), 1-21.
- Serrano E and Marín DH. 1998. Disminución de la productividad bananera en Costa Rica. *CORBANA* 23, 85-96.

## Réduction des pesticides en banane: les trajectoires du changement

Annaïg Blouin\*<sup>1-2</sup>, Carolina Dawson<sup>1-2</sup>, Jean-Michel Risede<sup>1-2</sup>, François Cote<sup>3</sup>, Luc de Lapeyre<sup>1-2</sup>, Denis Loeillet<sup>1-2</sup>  
<sup>1</sup>CIRAD, UPR GECO, F-34398 Montpellier, France, <sup>2</sup>GECO, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France, <sup>3</sup>CIRAD F-34398  
Montpellier, France

\**Autor de correspondencia:*  
Annaïg Blouin  
annaig.blouin@cirad.fr

*Contribución:*  
Artículo Científico

*Sección:*  
Fitosanidad

*Recibido:*  
15 diciembre, 2025

*Publicado:*  
30 abril, 2026

*Cita:*  
Blouin A, Dawson C, Risede JM, Cote F, de Lapeyre L, Loeillet D. 2026. Réduction des pesticides en banane: les trajectoires du changement. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 104  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26104>

### RESUMEN

La cadena de la banana de postre destinada a la exportación se ha basado históricamente en un modelo agrícola intensivo, fuertemente dependiente de los insumos químicos, hoy cuestionado por desafíos ambientales, sanitarios, regulatorios y sociales. En este contexto, la transición agroecológica aparece como una respuesta indispensable, pero compleja de implementar en una cadena globalizada, especializada y sometida a fuertes restricciones comerciales. La banana constituye así un caso paradigmático de cadena «bloqueada», dentro de la cual coexisten diferentes trayectorias de transición. El análisis se apoya en estudios de caso procedentes del programa PRETAG, centrados en la cadena de la banana que abastece al mercado francés. Pone de manifiesto tres principales vías de transición: territoriales (caso de las Antillas francesas); impulsadas por actores individuales o por cadenas de suministro; y colectivas, a escala de la cadena de valor, basadas en dinámicas multi-actor. Estas trayectorias difieren en su impacto, su ritmo y los volúmenes involucrados, pero todas siguen siendo fuertemente dependientes de la contextualización local. Los resultados muestran que la transición no puede lograrse sin un acompañamiento técnico, organizativo y económico, y llaman a la investigación a desempeñar un papel activo en la evaluación de impactos, el apoyo a los cambios de escala y la dinamización de las dinámicas colectivas.

**Palabras clave:** Transición agroecológica, Banana, Pesticidas, Trayectoria del cambio, Dinámicas multi-actor

### ABSTRACT

The export dessert banana value chain has historically relied on an intensive agricultural model highly dependent on chemical inputs, which is now being challenged by environmental, health, regulatory and societal concerns. In this context, the agroecological transition appears as an essential response, yet one that is complex to implement within a globalized, specialized value chain subject to strong commercial constraints. Bananas thus constitute a paradigmatic case of a “locked-in” value chain, within which different transition pathways coexist. The analysis draws on case studies from the PRETAG program, focusing on the banana value chain supplying the French market. It highlights three main transition pathways: territorial pathways (in the case of the French West Indies); pathways initiated by individual actors or supply chains; and collective pathways at the value-chain level, based on multi-actor dynamics. These pathways differ in terms of their impact, pace and the volumes involved, but all remain strongly dependent on local contextualization. The results show that the transition cannot succeed without technical, organizational and economic support, and call for research to play an active role in impact assessment, support for scaling-up processes, and the facilitation of collective dynamics.

**Keywords:** Agroecological transition, Banana, Pesticides, Transition pathway, Multi-actors dynamics



## INTRODUCTION

La culture de la banane dessert repose, depuis plusieurs décennies, sur un modèle agricole intensif largement dépendant d'intrants chimiques, notamment pour le contrôle phytosanitaire. Ce modèle est aujourd'hui remis en question par (i) les impacts environnementaux (pesticides-notamment la santé des travailleurs et des riverains, qualité de l'eau, érosion, biodiversité), (ii) les maladies émergentes, (iii) les pressions réglementaires, (iiii) les attentes issues de l'aval de la chaîne de valeur, portées par les consommateurs et des distributeurs. Dans ce contexte, la transition agroécologique s'impose comme une réponse possible, mais sa mise en œuvre est complexe dans une filière mondialisée, hautement spécialisée et régulée par de fortes contraintes commerciales. Pour ces raisons, la filière banane dessert constitue un cas paradigmatique de filière verrouillée pour laquelle il est pertinent d'explorer les différents chemins existants vers la transition agroécologique.

*Quels sont les types de trajectoires de transition agroécologique observables, et comment les acteurs de la filière contribuent-ils — ou résistent-ils — à la transformation du système de production ?*

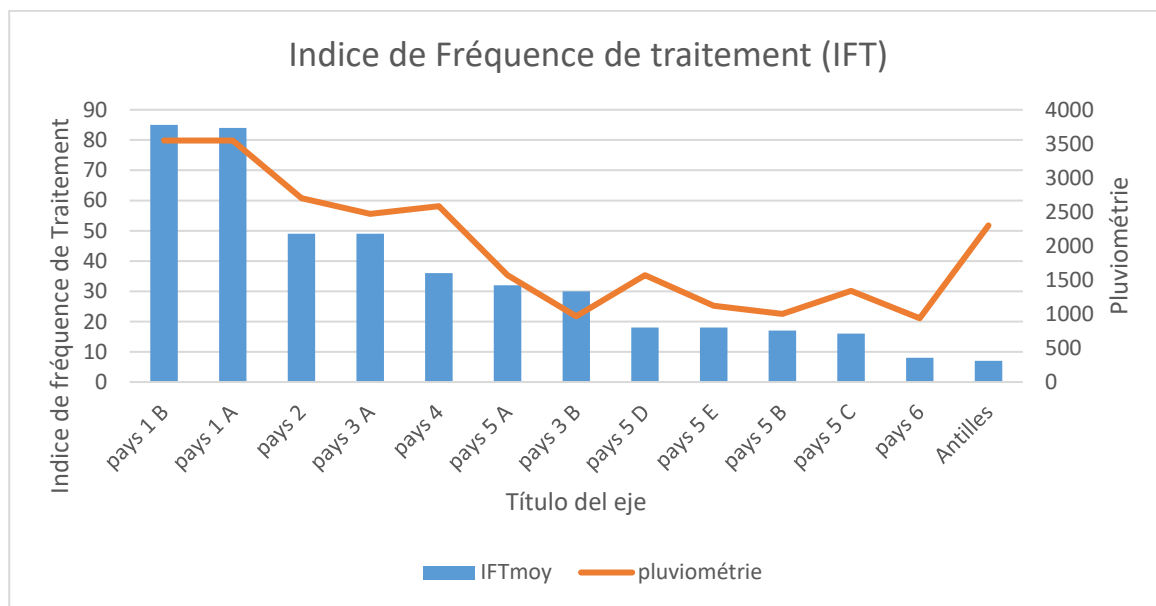
### **Enjeux de la filière banane mondialisée**

Avec environ 140 millions de tonnes produites chaque année dans plus de 150 pays, la banane (dessert et à cuire) participe à la sécurité alimentaire de nombreux pays. La banane est largement consommée localement, mais approvisionne aussi un marché régional très dynamique. À l'exportation (grand export), ce sont plus de 24 millions de tonnes de bananes dessert (type Cavendish et ré-exportation comprises) qui alimentent le marché Mondial. Le marché international est très dynamique et cela depuis la fin des années 1980. Selon la FAO, les exportations ont franchi la barre des 10 millions de tonnes en 1991 et celles des 22 millions en 2019.

Au-delà des enjeux économiques évidents, cette filière fait face à des enjeux environnementaux très importants, en particulier lié à l'utilisation importante de pesticides pour faire face à la pression phytosanitaire très forte dans certaines conditions. Même si certaines exploitations ont déjà enclenché une transition agroécologique, que ce soit volontaire ou contraint par la réglementation et/ou l'accès au marché, elles sont encore minoritaires.

C'est ainsi que l'utilisation de pesticides en plantation de bananes dessert destinées à l'export représenteraient près de 30 000 tonnes de matières actives par hectares et par an. Dans ce bilan, comme le montre le graphique ci-dessous, les fongicides représentent la part la plus importante des utilisations, en particulier pour

lutter contre *Pseudocercospora fijiensis*, responsable de la cercosporiose noire du bananier. (Synonyme de *Mycosphaerella fijiensis*) (De Lapeyre de Bellaire *et al.*, 2010).



**Figure 1:** Indice de Fréquence de Traitement fongique moyen en fonction des zones de production.

Comme pour beaucoup de changement de trajectoire agroécologiques, les moteurs du changement sont pluriels (Loeillet *et al.*, 2024).

Les premiers concernent les facteurs « internes » à la filière : réglementation, cahiers des charges privés, limites techniques liées notamment aux maladies émergentes, préoccupations sociétales. Les seconds sont des facteurs externes tels que les événements climatiques, les crises politiques et tensions internationales.

### Cadres d'analyse – méthodologie

Les systèmes bananiers peuvent être analysés comme des régimes sociotechniques stabilisés (Geels 2002 ; Rip & Kemp 1998) reposant sur : (i) un prix de marché très bas, (ii) une dépendance à une variété génétiquement uniforme, donc une infrastructure portuaire et logistique dédiée, (iii) des normes globalisées (GLOBALG.A.P., Rainforest Alliance). La transition agroécologique nécessite de desserrer ces verrous technologiques, organisationnels et commerciaux. La filière bananière rassemble une pluralité d'acteurs dont les intérêts, logiques d'action et ressources peuvent être parfois convergent, parfois opposés. Ces divergences structurent les conditions de la transition. Les producteurs cherchent généralement à réduire leur exposition aux risques agronomiques et économiques ; les institutions

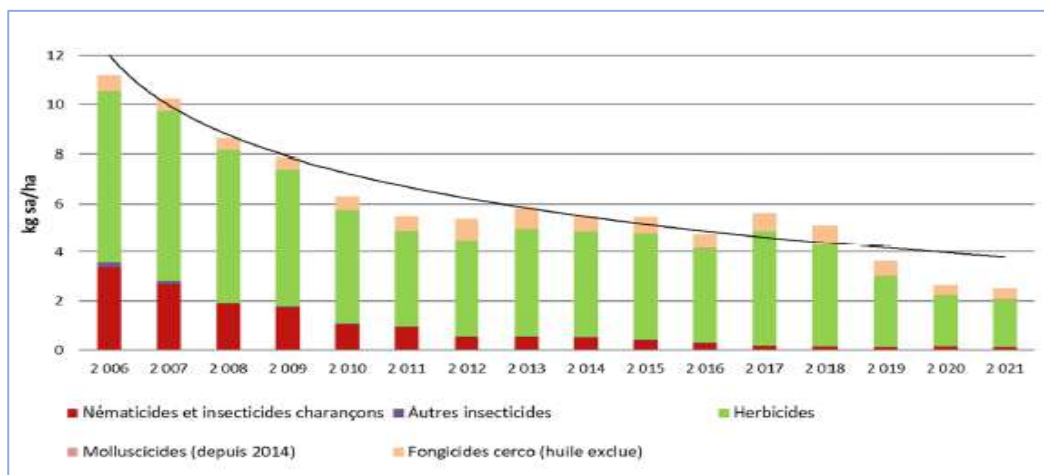
règlementent les normes phytosanitaires pour garantir la sécurité des aliments ; les exportateurs privilégient la conformité aux normes internationales de qualité; les distributeurs européens imposent des exigences croissantes en termes de durabilité ; les instituts de recherche privilégient l'expérimentation technique ; les organisations non gouvernementales défendent des objectifs de biodiversité ou de justice sociale.

L'analyse présentée est issue des travaux collectifs réalisés dans le cadre de l'Initiative PRETAG – Pesticides Reduction for Tropical Agriculture (website, Cote et al 2025). Elle porte sur des cas d'études issue de la filière banane exportée sur le marché français et européen (?), et concerne des périmètres territoriaux ou des supply chain d'approvisionnement liées à un distributeur. Cette approche met ainsi en lumière le caractère collectif, parfois institutionnellement encadré de la transition agroécologique. Elle permet de comprendre pourquoi certaines trajectoires émergent dans certains territoires et non dans d'autres, et comment les rapports d'acteurs conditionnent la profondeur des transformations possibles. Parce qu'analyser les chemins de transition menant à la réduction des pesticides de synthèse, c'est aussi se poser la question du rôle des différents acteurs et l'objectif attendu : Est-on dans la performance, comme c'est le cas pour la plupart des certifications, ou cherche-t-on un véritable impact (Macombe & Loeillet, 2016) ? Est-on sur une obligation de moyens, ou de résultats ? C'est bien la notion d'impact qui évite le green washing.

### **Les chemins de transition**

Les chemins de transitions sont pluriels et dépendent des acteurs impliqués, de leur fonction dans la filière, ainsi que des périmètres concernés.

**Périmètre territorial.** Le cas de la filière banane française, dont la production est située dans les Antilles françaises en Guadeloupe et Martinique, est assez unique car elle est située en zone tropicale, mais soumise à la réglementation européenne, dont elle subit les contraintes, mais bénéficie aussi de ses politiques de soutien. C'est ainsi que dans le cadre du "plan Banane Durable" entre 2008 et 2020, les Antilles ont su réduire l'utilisation des pesticides, en particulier les insecticides et nématicides grâce aux techniques alternatives telles que la jachère et le piégeage par exemple (Risède *et al.*, 2018). On estime ainsi que la filière a réduit de près des trois-quarts l'usage des pesticides de synthèse en l'espace de 15 ans.



**Figure 2:** Evolution des IFT aux Antilles Françaises – Risede *et al.*, 2018.

Dans ce cas d'étude, le moteur principal du changement est issu de la réglementation. Les changements obtenus sont profonds, radicaux et ont eu un impact territorial important. Il est également important de préciser que cette transition s'est accompagnée à la fois par le développement d'innovations techniques grâce à des programmes de recherche financés, et par un accompagnement technique, mais aussi économique, avec des aides de soutien pour la compétitivité des exploitations et le maintien d'une production sur le territoire.

**Périmètre d'acteurs.** Qu'elles soient individuelles (démarche d'une entreprise de production) ou qu'elles concernent l'ensemble d'une supply chain (démarche d'un distributeur pour l'ensemble de ses fournisseurs), les démarches de transition portées par des acteurs individuels peuvent présenter différents types de dynamiques.

Dans le cas du distributeur A (appelé ainsi pour des raisons de confidentialité) de nos cas d'étude, on observe un changement issu d'innovations de rupture. Le choix a été fait, par la rédaction d'un cahier des charges sous marque distributeur, de passer par des innovations de rupture : zéro insecticide, zéro nématocide avec l'ambition de tendre vers un zéro herbicide et un zéro post-récolte de synthèse. Néanmoins, le principal levier de cette transition étant un segment de marché spécifique, il est limité à la chaîne d'approvisionnement concernée par ce cahier des charges, ce qui en restreint l'impact.

Un autre distributeur (que nous appellerons B), a fait le choix d'emmener l'ensemble de ses fournisseurs dans une transition agroécologique incrémentale. La dynamique des transitions est progressive, avec des tests sur des sites pilotes et après démonstration de leur réussite, un changement d'échelle progressive en testant les innovations dans les différentes conditions de production. L'ensemble des acteurs de

la supply chain sont impliqués (producteur, exportateur, importateur et mûrisseur). Ce consortium multi-acteurs permet la construction d'une vision commune du futur, en tenant compte des contraintes de l'ensemble des acteurs, et en utilisant les leviers existants. Ces changements sont beaucoup plus lents, mais à terme impact beaucoup plus de volumes.

**Périmètre collectif.** Alors que la filière territoriale ne touche que le volume de ce territoire, les démarches collectives ont pour ambition d'emmener l'ensemble de la chaîne de valeur, qu'elle soit mondialisée, comme c'est le cas avec le World Banana Forum, ou qu'elle soit ciblée sur un marché, comme le vise l'Initiative Française pour une Banane Durable (IFBD) qui a pour ambition de transformer l'ensemble de la filière banane vendue sur le marché français. Dans ce cas, elle doit doser les efforts de transition demandés d'autant que les conditions d'un déploiement de solutions techniques et organisationnelles sont largement « contexte dépendant ». L'idée est donc bien d'emmener tout le monde, sur une trajectoire de progrès, sans discriminer aucune des sources d'approvisionnement. Cela implique (i) un très haut niveau de pilotage du fait que l'on emmène un nombre important de partie prenante, (ii) un déploiement dans des contextes sociotechniques diversifiés, (iii) que la réussite (les effets positifs) du processus est dépendant d'une participation effective, précoce et coordonnée de tous les maillons de la chaîne de valeur au processus de transition, (iiii) enfin, cela implique une discussion avec l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur des mesures d'accompagnement de ces changements, et ce, dans un esprit précompétitif et de volonté de responsabilité partagée.

Dans tous les cas d'études, il est essentiel de rappeler l'important de la contextualisation. Parce que les solutions agroécologiques ne sont jamais universelles : elles dépendent notamment du climat et de la pression phytosanitaire locale, mais aussi des ressources techniques (intrants, mécanisation, vitroplants...), humaine (formation du personnel) et financières des producteurs.

**Tableau 1.** Les chemins de la transition.

	<b>Transition territoriale</b>	<b>Transition d'acteurs</b>			<b>Transition collective</b>	
	<i>Antilles Françaises</i>	<i>Producteur</i>	<i>Distributeur A</i>	<i>Distributeur B</i>	<i>IFBD</i>	<i>WBF</i>
<b>Périmètre</b>	Producteurs de l'origine	Entreprise individuelle	Sous-filière géographique	Totalité de la supply-chain	Filière marché français	Tous les acteurs mondiaux
<b>Gouvernance</b>	Partagée (producteurs et institutions)	Volontaire	Imposée	Partagée	Collective	Collective
<b>Acteur dominant</b>	Etat	Producteur	Distribution	Distribution	Professionnels	/
<b>Déclencheur</b>	Crise environnementale (clordécone)	Stratégie d'entreprise	Stratégie d'entreprise	Stratégie d'entreprise	Recherche	FAO
<b>Leviers</b>	Réglementaires et financiers (aides), recherche	Anticipation réglementaire et compétitivité	Accès au marché (soft law) pour un segment marketing Cahier des charges	Accès au marché (soft law)	Anticipation réglementaire Accès au marché	Volonté partagée
<b>Innovation de rupture</b>	X		X			/
<b>Innovation incrémentale</b>		X		X	X	
<b>Transformatif</b>	oui	oui	Moyenne-ment	oui	oui	Plaidoyer
<b>Pas de temps</b>	+ de 30 ans	5 ans	5 ans	10 ans	10 ans	?
<b>Accompagnement économique du changement</b>	Argent public	Auto-financement	Prix d'achat supérieur	Pas de prix d'achat supérieur – finance-ment de l'accompagnement technique	En cours de travail sur la responsabilité partagée	/

## DISCUSSION – les conditions du changement et le rôle de la recherche

Ainsi les trajectoires de transition sont très différentes d'un opérateur à un autre. Les initiatives individuelles (un producteur) ou de filière territorialisée (un producteur – un metteur en marché – un distributeur) n'excluent pas les initiatives collectives (plateforme multi-acteurs) grâce auxquelles tous les acteurs travaillent en mode pré-compétitif et sur la production de biens communs. Ces trois chemins ne sont pas exclusifs : ils coexistent selon les territoires et les profils d'acteurs. Ils ne sont pas non plus linéaires surtout pour les trajectoires incrémentales : il y a des pauses, des allers-retours, des sauts. Le seul dénominateur commun indispensable à ces approches est la notion de valorisation des efforts de transition : Les structures d'incitation (prix, labels, aides publiques) orientent fortement les trajectoires.

Les verrous identifiés de la filière banane qui empêche la transition sont nombreux : système monovariétal, dépendance aux fongicides, logistique d'exportation exigeante, normes de qualité très stricte, risques technico-économiques liés aux faibles marges, faible marge de manœuvre des producteurs face aux distributeurs, et discordance entre marché américain (sans exigence agroécologique) et marché européen très forte. Ces éléments rendent le système difficile à transformer, et montrent que les transitions nécessitent non seulement des innovations techniques, mais aussi des évolutions organisationnelles et commerciales (Cote *et al*, 2022). Ils expliquent également pour la transition est lente : non parce que les acteurs ne veulent pas changer, mais parce que le système est structuré pour rester tel quel.

Cette analyse souligne la nécessité pour la recherche d'adopter un rôle actif dans les processus de transition, en allant au-delà de la production de référentiels techniques. Elle implique un accompagnement des changements d'échelle, une évaluation rigoureuse des coûts et bénéfices des transformations, ainsi qu'une contribution à l'animation des dynamiques multi-acteurs. Les études de cas montre qu'il n'y a pas de transition sans accompagnement ni responsabilité partagée. Le principal frein identifié réside dans l'insuffisante valorisation des efforts de transition, faute d'outils permettant d'évaluer les services rendus et de mettre en œuvre des mesures d'accompagnement effectives, notamment en matière de revalorisation des prix.

## CONCLUSION

Les chemins de transition en banane dessert export sont multiples et résultent d'une combinaison de dynamiques techniques, économiques et organisationnelles. Si l'optimisation du modèle intensif demeure dominante, des reconfigurations techniques progressent et, dans certains territoires, de véritables transformations systémiques émergent. Ces dernières, bien que minoritaires, démontrent la faisabilité d'un modèle bananier plus résilient, fondé sur la réduction des intrants et l'innovation organisationnelle.

La consolidation de ces trajectoires dépendra de l'évolution des standards internationaux, du soutien institutionnel et de la capacité de l'ensemble des acteurs à se mobiliser dans un partage de la valeur. La transition agroécologique ne relève plus d'un choix volontaire ou normatif, mais d'une condition de résilience des systèmes bananiers. Ne pas s'engager dans ces trajectoires, constitue un risque majeur pour la durabilité environnementale mais aussi économique de la chaîne de valeur.

## RÉFÉRENCES

- Côte FX, Rapidel B, Sourisseau JM, Affholder F, Andrieu N, Bessou C, Caron P, Deguine JP, Faure G, Hainzelin E, Malézieux E, Poirier-Magona E, Roudier P, Scopel E, Tixier P, Toillier A, Perret S. 2022. Levers for the agroecological transition of tropical agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 42 (4) : 11 p.
- De Lapeyre de Bellaire L, Fouré É, Abadie C, and Carlier, J. 2010. Black Leaf Streak Disease is challenging the banana industry. *Fruits* 65(6), 327–342.
- Geels Frank W. 2002. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy* 31(8-9), 1257-1274.
- Loeillet D, Dawson C, Blouin A. 2024. Marché mondial de la banane – Quel monde bananier demain ? *Fruitrop*, 12- 16
- Rip A and Kemp R. 1998. Technological change. *In: Steve Rayner & Elizabeth L. Malone (Eds.), Human Choice and Climate Change: Vol. II, Resources and Technology (pp. 327-399)*. Columbus, Ohio: Battelle Press.
- Macombe C, Loeillet D. 2016. Instrument d'évaluation des impacts sociaux des filières. In *Développement durable et filières tropicales*. Biénabe Estelle (ed.), Rival Alain (ed.), Denis Loeillet (ed.). Versailles: Ed. Quae, 249-257. (Agricultures et défis du monde)
- Risède JM, Achard R, Brat P, Chabrier C, Damour G, Guillermet C, De Lapeyre L, Loeillet d, Lakhia S, Meynard C, Tixier P, Tran Quoc H, Salmon F, Cote FX, Dorel M. 2018. La transition agro-écologique des systèmes de culture de bananes Cavendish aux Antilles françaises. Pages 107-26. In *La transition agro-écologique des agricultures du Sud*, Côte *et al.*, AFD, Cirad, Editions QUAE, Versailles, 368 p.
- Côte FX, Le Bellec F, Martin T, Temple L, Blouin A, Loeillet D, Baufume S, Ghneim Herrera T. 2025. Rapport final de l'initiative " Pesticide Reduction for Tropical Agricultures " (Pretag) 2023-2024. Montpellier: CIRAD, 143 p. <https://www.pretag.org/>

## Systems-based management of black Sigatoka in the french west Indies

Elie Lare<sup>1\*</sup>, Coralie Julan<sup>1</sup>, Yuko Krzyzaniak<sup>1</sup>, Léa Williams<sup>1</sup>, Loïc Monsoreau<sup>1</sup>, Dimiline Tahaba<sup>1</sup>, Marcus Hery<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>IT2 (Institut Technique Tropical), Martinique, France

**\*Autor de correspondencia:**

Elie Lare  
e.lare@it2.fr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**

Lare E, Julan C, Krzyzaniak Y, Williams L, Monsoreau L, Dim Tahaba D, Hery M. 2026. Systems-based management of black Sigatoka in the french west Indies. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 105 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26105>

### ABSTRACT

The agroecological transition undertaken by the French banana sector in recent years has compelled research to explore innovative strategies for managing black leaf streak disease (black Sigatoka) in banana. This study adopted a systems-based approach combining several agronomic levers likely to influence banana immunity, namely cultivar choice, planting density, and foliar magnesium application. Twelve production systems were evaluated, resulting from the combination of two cultivars (Gal and Nord E3), three planting densities (1350, 1800, and 2000 plants ha<sup>-1</sup>), and two magnesium levels (with and without application). Results highlighted a greater tolerance to black Sigatoka in systems planted at 1350 plants ha<sup>-1</sup>. Magnesium application further reduced disease pressure by 17%. Synergistic effects among the factors were generally limited, except for the significant yield improvement observed in cultivar Gal under the 1350 plants ha<sup>-1</sup> density combined with magnesium application.

**Keywords:** Black Sigatoka, Systems approach, Planting density, Cultivar, Magnesium application

### RESUMEN

La transición agroecológica emprendida por el sector bananero francés en los últimos años ha impulsado la investigación hacia nuevas estrategias para el manejo de la sigatoka negra del banano. Este estudio adoptó un enfoque sistémico, combinando diversos factores agronómicos que pueden influir en la inmunidad del cultivo, como la variedad, la densidad de plantación y la aplicación foliar de magnesio. Se evaluaron doce sistemas de producción, resultantes de la combinación de dos variedades (Gal y Nord E3), tres densidades de plantación (1350, 1800 y 2000 plantas ha<sup>-1</sup>) y dos niveles de aplicación de magnesio (con y sin). Los resultados mostraron una mayor tolerancia a la sigatoka negra en los sistemas con una densidad de 1350 plantas ha<sup>-1</sup>. La aplicación de magnesio permitió además reducir la presión de la enfermedad en un 17 %. Los efectos sinérgicos entre factores fueron generalmente limitados, salvo el incremento significativo de productividad observado en la variedad Gal al combinar la densidad de 1350 plantas ha<sup>-1</sup> con la aplicación de magnesio.

**Palabras clave:** Sigatoka negra, Enfoque sistémico, Densidad de plantación, Variedad, Aplicación de magnesio



## INTRODUCCIÓN

Banana production plays a central role in the economy of the French West Indies, covering nearly 7,000 ha (5,000 ha in Martinique and 2,000 ha in Guadeloupe), mainly devoted to Cavendish cultivation. In 2022, the French banana sector produced 210,000 t (145,000 t in Martinique and 56,000 t in Guadeloupe), representing a 21% decrease compared with 2012 (265,000 t), despite stable planted areas (Memento Agreste DAAF, 2022). This decline in production is largely attributable to the high susceptibility of Cavendish bananas to black Sigatoka. The disease, caused by the fungus *Mycosphaerella fijiensis* Morelet [anamorph: *Pseudocercospora fijiensis* (Morelet) Deighton], induces necrotic lesions that destroy large portions of leaf tissue, leading to substantial yield losses (Churchill, 2011). It also negatively affects fruit quality (Castelan et al., 2013). Today, black Sigatoka represents the main limiting factor for banana production in the French West Indies, despite the prioritization of its territorial management (De Lapeyre de Bellaire et al., 2023). Classified as a regulated quarantine pest since 2020, the pathogen poses an increasing threat to the sustainability of the banana sector, particularly under ongoing climatic and sociopolitical changes.

Sociopolitical changes, including the widespread withdrawal of curative fungicides (mancozeb and several triazoles) and the cessation of aerial spraying, have considerably complicated disease management, which previously relied heavily on these practices. Under this new context, research is compelled to explore alternative management strategies to ensure the long-term sustainability of the sector.

Within the framework of the CERCOTROP project (Scaling up alternative solutions for black Sigatoka control in tropical banana-growing conditions of the French West Indies), which aims to implement alternatives to triazoles and other synthetic fungicides, this study focused on a systems-based approach to disease management. Unlike crop protection strategies based on individual actions (mainly agrochemical), the systems approach, combines multiple agronomic levers that can influence banana plant immunity. Accordingly, this study combined three key levers, namely cultivar choice, planting density, and foliar magnesium application, to design cropping systems more tolerant to black Sigatoka and less dependent on curative measures.

## MATERIALS AND METHODS

### Experimental design

The experiment was conducted on a 1.8 ha plot planted in July 2024 at Petit Morne (Lamentin, Martinique). Two Cavendish cultivars, Gal and Nord E3, supplied

respectively by AVP (Antilles Vitro Plants) and PROTEIN, were evaluated under three planting densities (1350, 1800, and 2000 plants ha<sup>-1</sup>) and two foliar magnesium levels (with and without magnesium application). In total, 12 treatments, each representing a distinct management system, were assessed using a split-plot experimental design, with planting density as the main factor (Table 1). Banana plants were established in double rows, and foliar magnesium applications (Tim Foliup) were performed using a BARGAN sprayer at a rate of 8 L ha<sup>-1</sup>. The conventional management practice in the French West Indies (control) corresponded to the Gal cultivar planted at 1800 plants ha<sup>-1</sup> without magnesium application. Assessments were conducted over the first crop cycle and will be repeated over two additional cycles to strengthen the results.

**Table 1:** Tested treatments.

Planting density	Cultivar	Foliar fertilizer (magnesium)	Treatments
<b>D1 : 1350 plants ha<sup>-1</sup></b>	V1 : Gal	F0 : without magnesium application	D1V1F0
		F1 : with magnesium application	D1V1F1
	V2 : Nord E3	F0 : without magnesium application	D1V2F0
		F1 : with magnesium application	D1V2F1
<b>D2 : 1800 plants ha<sup>-1</sup></b>	V1 : Gal	F0 : without magnesium application	D2V1F0
		F1 : with magnesium application	D2V1F1
	V2 : Nord E3	F0 : without magnesium application	D2V2F0
		F1 : with magnesium application	D2V2F1
<b>D3 : 2000 plants ha<sup>-1</sup></b>	V1 : Gal	F0 : without magnesium application	D3V1F0
		F1 : with magnesium application	D3V1F1
	V2 : Nord E3	F0 : without magnesium application	D3V2F0
		F1 : with magnesium application	D3V2F1

### Assessment of black Sigatoka pressure and banana plant health

For each treatment, a random sample of 10 banana plants at 12 weeks of age was monitored weekly to assess disease pressure and overall plant health. Disease pressure was estimated using the Stage of Evolution of the Disease (SED), as described by Fouré and Ganry (2008). This composite index integrates a cumulative severity score

(Sumcoeff), derived from symptom stages defined by Fouré (1982) and observed on leaves 2, 3, and 4, with the foliar emission rate, which reflects banana plant growth dynamics.

The sanitary status of plots was assessed using the youngest necrotic leaf (YNL), defined as the rank of the youngest leaf showing necrotic lesions corresponding to stages 5 or 6 of *M. fijiensis* infection (Fouré, 1982).

Banana plant health was further evaluated on a sample of 30 plants by recording the number of leaves retained at flowering and the mean bunch weight at harvest.

### Statistical analyses

Data were analyzed using RStudio software. Areas under the disease progress curve (AUDPC) were calculated for both Stage of Evolution of the Disease (SED) and youngest necrotic leaf (YNL). Generalized linear models (GLM), followed by Tukey's test ( $\alpha < 0.05$ ), were used to discriminate among treatments. The same model was applied to analyze the number of leaves at flowering. Differences in mean bunch weight were assessed using a classical linear model.

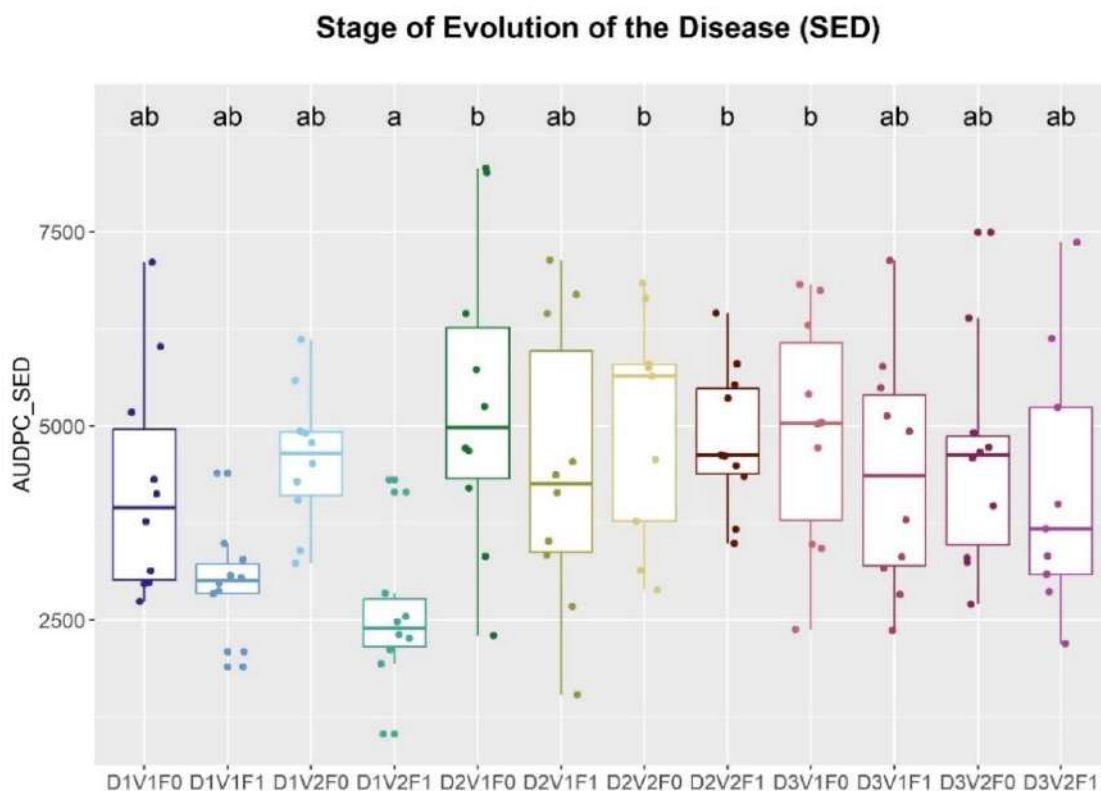
## RESULTS AND DISCUSSION

### Performance of management systems

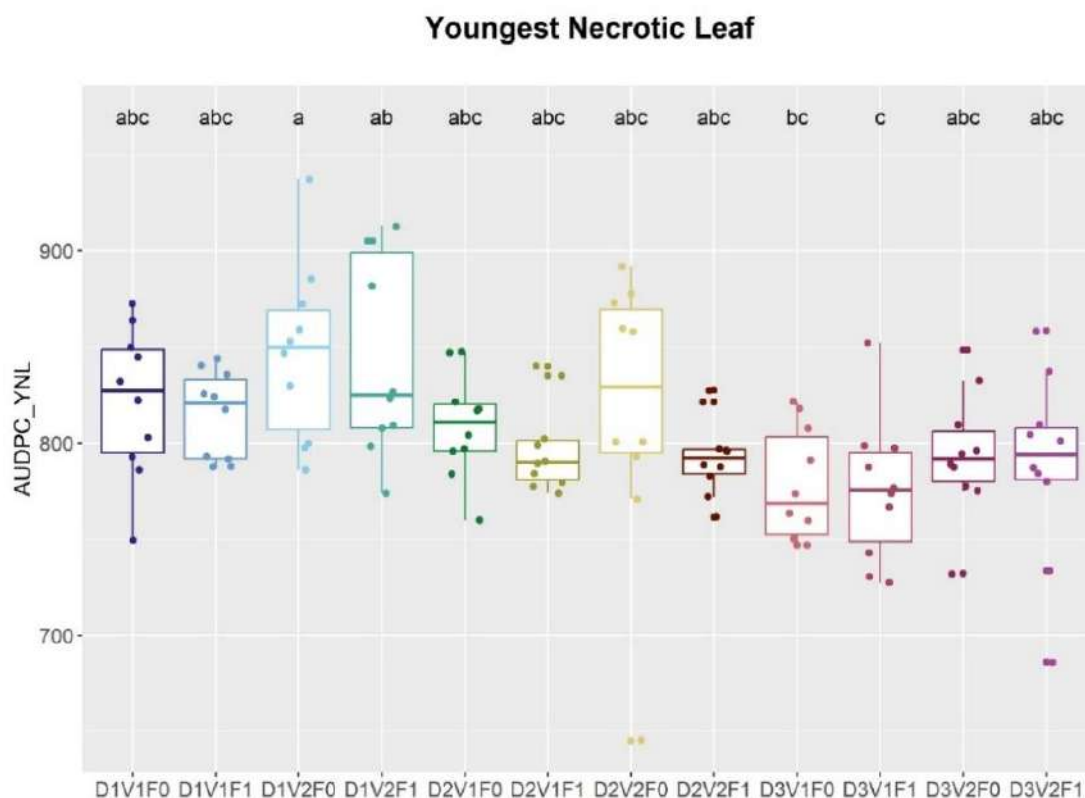
Stage of Evolution of the Disease (SED) differed among management systems (Figure 1). The lowest disease pressure levels were observed in systems associated with the 1350 plants  $\text{ha}^{-1}$  density (D1V1F0, D1V2F0 et D1V2F1), highlighting a clear effect of planting density on disease behavior. No marked differences were observed between systems established at 1800 and 2000 plants  $\text{ha}^{-1}$ . These findings are consistent with those reported by Pujari et al. (2024), who showed a significant reduction in disease severity at low planting densities. Beyond 1800 plants  $\text{ha}^{-1}$ , disease pressure appeared to stabilize.

Similarly, the rank of the youngest necrotic leaf differed significantly between systems at 1350 plants  $\text{ha}^{-1}$  (D1V2F0 et D1V2F1) and those at 2000 plants  $\text{ha}^{-1}$  (D3V1F0 et D3V1F1) (Figure 2). This result illustrates a reduction in disease severity under low planting densities, consistent with the findings of Pujari et al. (2024). This reduction is likely attributable to improved plot aeration, promoting faster leaf drying (less favorable humidity conditions for spore and conidia germination). In addition to planting density, foliar magnesium application influenced disease behavior, resulting in a 17% reduction in disease pressure (Figure 1). This contrasts with earlier findings

by Alvarado (2007) and may be explained by differences in magnesium formulation, as magnesium hydroxide was used in the present study (Tim Foliup 8 L ha<sup>-1</sup>).



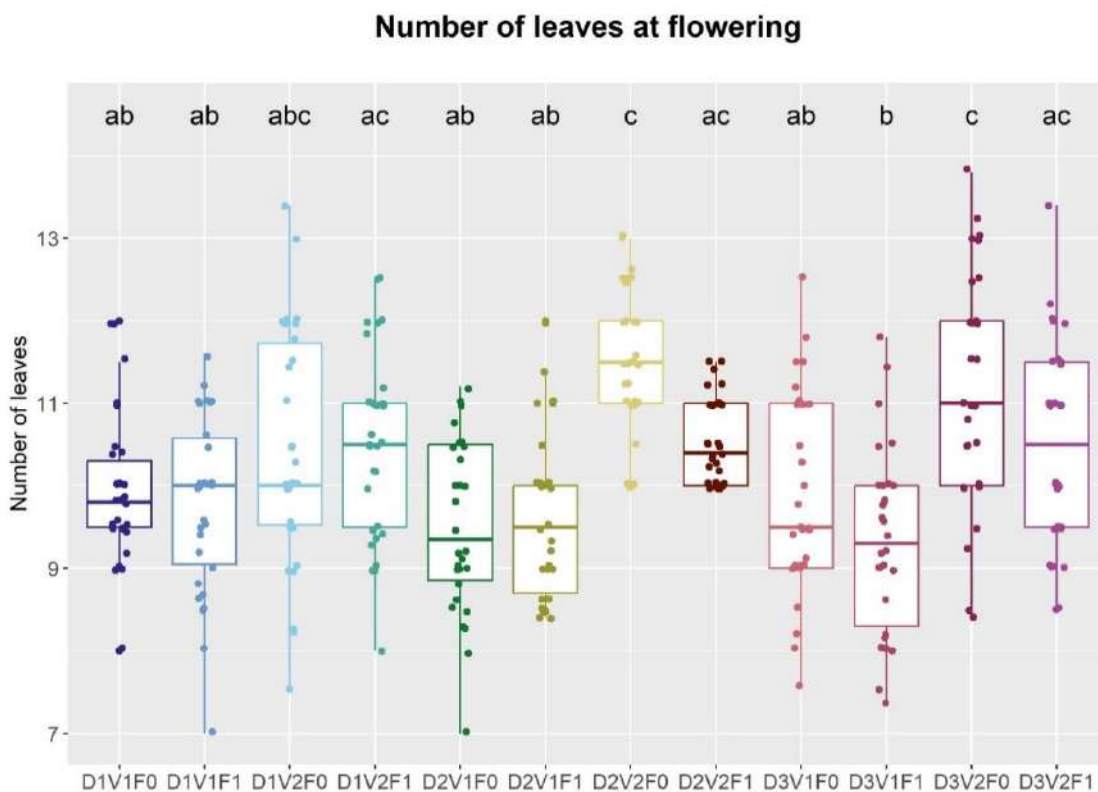
**Figure 1.** Area under the disease development progress curve (AUDPC) for each management system. AUDPC values were calculated over 15 weeks of monitoring, and generalized linear models (GLM), followed by Tukey's test ( $\alpha < 0.05$ ), were used to compare systems. Different letters indicate significant differences among systems.



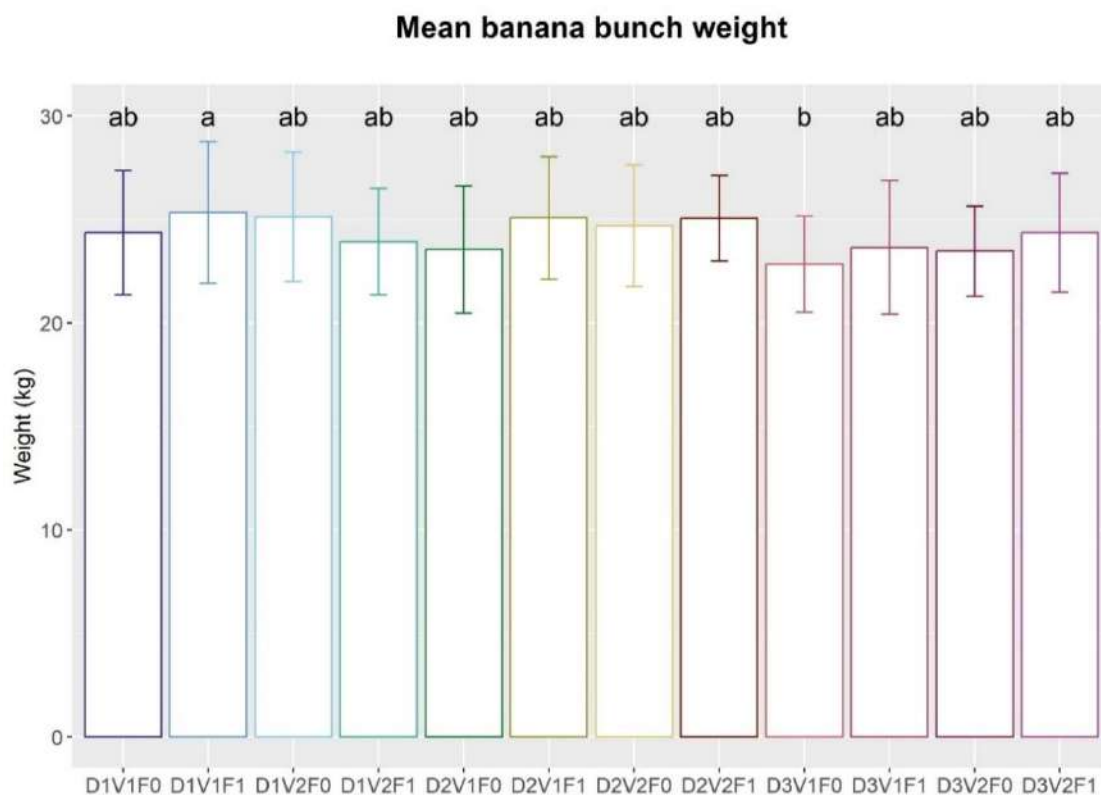
**Figure 2.** Area under the youngest necrotic leaf progress curve (AUDPC\_YNL) for each management system. AUDPC values were calculated over 15 weeks of monitoring. Generalized linear models (GLM), followed by Tukey’s test ( $\alpha < 0.05$ ), were used to compare systems. Different letters indicate significant differences among systems.

### Effects on banana plant health and productivity

Systems associated with the Nord E3 cultivar exhibited, on average, one additional leaf at flowering compared with those planted with Gal, suggesting a genetic advantage of Nord E3, despite similar susceptibility to black Sigatoka (Figure 3). Regarding productivity, a significant difference was observed only between the D1V1F1 and D3V1F0 systems, with the former producing bunches that were approximately 2 kg heavier (Figure 4). Given the comparable productivity of the other systems, this increase likely reflects a synergistic effect between low planting density (1350 plants ha<sup>-1</sup>) and magnesium application on the productivity of the Gal cultivar.



**Figure 3.** Number of leaves retained at flowering for each management system. Comparisons among systems were performed using generalized linear models (GLM), followed by Tukey’s test ( $\alpha < 0.05$ ). Different letters indicate statistically significant differences among systems.



**Figure 4.** Mean banana bunch weight for each management system. Statistical differences were assessed using analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey’s post hoc test ( $\alpha < 0.05$ ) to discriminate among systems. Different letters indicate significant differences.

## CONCLUSION

This study demonstrates the existence of effective alternative cropping systems for managing black Sigatoka in banana. Systems established at low planting density ( $1350 \text{ plants ha}^{-1}$ ) exhibited greater tolerance to the disease, characterized by reduced disease pressure and improved sanitary status. Foliar application of magnesium hydroxide further contributed to lowering disease pressure. The Nord E3 cultivar consistently produced one additional leaf compared with Gal, indicating a potential varietal advantage. However, synergistic effects among the studied factors were limited, except for the productivity gain observed in the Gal cultivar when low planting density was combined with magnesium application.

## REFERENCES

- Alvarado AD. 2007. Efecto de la fertilización foliar con Ca, Mg, Zn y B en la severidad de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet), en el crecimiento y la producción del banano (*Musa* AAA, cv. Grande Naine). Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 85 p.
- Castelan FP, Abadie C, Hubert O, Chilin-Charles Y, de Lapeyre de Bellaire L and Chillet M. 2013. Relation between the severity of Sigatoka disease and banana quality characterized by pomological traits and fruit green life. *Crop Protection* 50:61-65.
- Churchill ACL. 2011. *Mycosphaerella fijiensis*, the black leaf streak pathogen of banana: Progress towards understanding pathogen biology and detection, disease development, and the challenges of control. *Molecular Plant Pathology* 12:307-328.
- DAAF Martinique (Editeur technique). 2022. Mémento Agreste 2022: L'agriculture, la forêt et l'agroalimentaire en Martinique. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Fort-de-France, Martinique. 152 p.
- De Lapeyre de Bellaire L, Fouré E, Abadie C. 2023. La cercosporiose noire du bananier (*Pseudocercospora fijiensis*) dans les Antilles françaises: impacts, contraintes et stratégies de gestion territoriale. In: de Lapeyre de Bellaire L, Risède JM (Eds.). *Lutte agroécologique contre les bioagresseurs et organisation des paysages dans les Antilles françaises*. Éditions Quæ. Versailles, France. p. 145–168.
- Fouré E. 1982. Les cercosporioses du bananier et leurs traitements : comportement des variétés. Étude de la sensibilité variétale des bananiers et plantains à *Mycosphaerella fijiensis* Morelet (maladie des raies noires) au Gabon I. Incubation et évolution de la maladie. *Fruits*, 37(12), 749–771.
- Fouré E and Ganry J. 2008. A biological forecasting system to control black leaf streak disease of bananas and plantains. *Fruits*, 63(5), 311–317.
- Pujari CV, Mendhe AR, Gujar VT, Gulave CM, and Wagh PP. 2024. Effect of Different Plant Spacings on Growth, Yield and Disease Incidence in Banana CV. Phule Pride. *Journal of Experimental Agriculture International* 46 (8):666-73.

## Control of black leaf streak disease without mancozeb in commercial plantations of Colombia

Simon Gibert<sup>1,3\*</sup>, Romain Alcrudo<sup>1,4</sup>, Annaïg Blouin<sup>2,3</sup>, Richard Andrade<sup>4,5</sup>, Ferney Cruz<sup>4,5</sup>, Antonio Gonzales<sup>4,5</sup>, Ines Dupouy<sup>6</sup>, Denis Ravanat<sup>7</sup>, Philippe Pons<sup>7</sup>, Luc de Lapeyre<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, UPR GECO, F-97285 Le Lamentin, Martinique, France, <sup>2</sup>CIRAD, UPR GECO, F-34398 Montpellier, France, <sup>3</sup>GECO, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France, <sup>4</sup>C.I. Técnicas Báltimo de Colombia S.A., Santa Marta, Colombia, <sup>5</sup>Grupo Agrovid S.A.S., Santa Marta, Colombia, <sup>6</sup>LIDL France, Châtenay-Malabry, France, <sup>7</sup>AZ France S.A., Cavaillon, France.

**\*Autor de correspondencia:**

Simon Gibert  
simon.gibert@cirad.fr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

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

**Cita:**  
Gibert S, Alcrudo R, Blouin A, Andrade R, Cruz F, Gonzales A, Dupouy I, Ravanat D, Pons P, de Lapeyre L. 2026. Control of black leaf streak disease without mancozeb in commercial plantations of Colombia. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 106 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26106>

### ABSTRACT

Black Leaf Streak Disease (BLSD) is the main pathogenic constraint for Cavendish banana production systems intended for export. Conventional control strategies of this damaging disease largely rely on weekly applications of mancozeb, often combined with curative fungicides that frequently lost effectiveness due to the emergence of fungal resistance driven by their intensive use. Such strategies are no longer considered sustainable due to technical, environmental, economic, and regulatory reasons. Indeed, mancozeb has been banned in the European Union (EU) since 2021, and additional restrictions on dithiocarbamates are expected under the European Green Deal. Here, we conducted a one-year evaluation of an alternative control strategy in a commercial plantation of Colombia, characterized by a humid tropical climate with a distinct dry season. This strategy is based on a biological forecasting system that supports rational treatment decisions through weekly monitoring of epidemiological and climatic parameters. It excludes mancozeb and other active substances not approved in the EU and promotes the use of mineral oil and SBI group 2 fungicides.

Results showed that this forecasting-based strategy achieved disease control comparable to the conventional program used in an adjacent plantation. The Treatment Frequency Index was reduced by 60%, the amount of active ingredients applied by 78%, and the use of non-EU-approved substances by 89%. Treatment costs were reduced by 36%, while disease pressure, fruit quality, and yield were maintained. These promising results support scaling up this approach to larger production areas.

**Keywords:** Black Leaf Streak Disease, Black Sigatoka, Banana, *Pseudocercospora fijiensis*, Biological forecasting, Colombia, Fungicide, Mancozeb, Plant protection

### RESUMEN

La Sigatoka Negra representa la principal limitación fitosanitaria para los sistemas de producción de banano Cavendish destinados a la exportación. El control convencional se basa en aplicaciones semanales de mancozeb, combinadas con fungicidas curativos cuya eficacia ha disminuido debido al desarrollo de resistencia asociado a su uso intensivo. Sin embargo, estas estrategias ya no se consideran sostenibles por razones técnicas, ambientales, económicas y regulatorias. El mancozeb fue prohibido en la Unión Europea (UE) en 2021 y se prevén restricciones adicionales sobre los ditiocarbamatos en el marco del Pacto Verde Europeo. En este estudio se evaluó durante un año una estrategia alternativa en una plantación comercial de Colombia, en clima tropical húmedo con estación seca marcada. La estrategia se basa en un sistema de alerta biológica que orienta decisiones de tratamiento mediante el monitoreo semanal de parámetros epidemiológicos y climáticos. Excluye el mancozeb y otras sustancias no aprobadas en la UE, y favorece el uso de aceite mineral y fungicidas IBS del grupo 2.

La estrategia logró un nivel de control comparable al programa convencional en una plantación adyacente. El Índice de Frecuencia de Tratamientos se redujo en un 60 %, la cantidad de ingrediente activo en un 78 % y el uso de sustancias no aprobadas en la UE en un 89 %, con una reducción del 36 % en los costos de tratamiento, sin afectar la presión de la enfermedad, la calidad del fruto ni el



rendimiento. Estos resultados prometedores respaldan la ampliación de esta estrategia a superficies de producción más extensas.

**Palabras clave:** Sigatoka negra, Banana, *Pseudocercospora fijiensis*, Preaviso biológico, Colombia, Fungicida, Mancozeb, Protección vegetal

## INTRODUCTION

Black Leaf Streak Disease (BLSD) is the primary phytopathological constraint affecting export-oriented Cavendish banana production. The disease is caused by the ascomycete fungus *Pseudocercospora fijiensis*, which initially produces small lesions on young leaves that gradually elongate into black streaks, multiply, and eventually coalesce to form extensive necrotic zones on the leaf surface. In severe cases, the defoliation caused by the disease can significantly reduce the plant's photosynthetic capacity, leading to smaller fruit size and lower yields. However, this impact is generally limited in commercial plantations if more than 5 to 7 functional leaves are maintained at harvest (De Lapeyre de Bellaire *et al.*, 2010). Most importantly, leaf necrosis can trigger premature fruit ripening and significantly reduce the post-harvest green life of bananas (Castelan *et al.*, 2012, 2013). Consequently, insufficient disease control in plantations may result in bunches unsuitable for export market, thereby causing significant economic losses.

In most banana-exporting countries, conventional control strategies of this damaging disease largely rely on weekly applications of contact fungicides such as mancozeb, often combined with curative molecules that have frequently become ineffective due to the emergence of fungal resistance resulting from their intensive use over many years. Such strategies are no longer considered sustainable due to technical, environmental, economic, and regulatory concerns (De Lapeyre de Bellaire *et al.*, 2010, 2024). Indeed, mancozeb was already banned in the European Union (EU) in 2021, and the forthcoming introduction of mirror clauses under the Green Deal, along with the reduction of Maximum Residue Limits (MRLs) for dithiocarbamates within the EU, may soon prohibit the use of this fungicide.

Within a collaborative framework involving actors from production, import, distribution, and research (Tebaco Group, Orcero, AZ France, LIDL France, and Cirad), we conducted a one-year evaluation of an alternative control strategy in a pilot commercial plantation located in the Magdalena department of Colombia, a region characterized by a tropical climate with a distinct dry season. This strategy is based on a biological forecasting system that enables a rational use of fungicides in compliance with EU regulations, including the complete exclusion of mancozeb and other active substances not approved in the EU. This strategy, initially developed to control Yellow

Sigatoka and successfully implemented to control BLSD in the French West Indies (Ganry *et al.*, 2008, 2012), has also been applied effectively in different production contexts, such as in the dry tropical conditions of the Dominican Republic (Guillermet *et al.*, 2014), where fungicide resistance had already emerged, as well as in more humid conditions of commercial plantations of Ivory Coast (De Lapeyre De Bellaire *et al.*, 2024). It relies on the weekly monitoring of epidemiological, biological, and climatic parameters to guide treatment decisions only when necessary, combined with the broader use of mineral oil and fungicides from Sterol biosynthesis Inhibitors of group 2 (SBI), which are less prone to resistance development. This study assesses the technical feasibility and phytosanitary, agronomic, and economic performance of this biological forecasting strategy under commercial conditions, with the objective of demonstrating its suitability for large-scale implementation.

## **MATERIALS AND METHODS**

### **Pilot commercial farm selection and characteristics**

In 2023, under the initiative of LIDL France, a collaborative project with Cirad was launched to evaluate, in a pilot commercial farm of the company Tecbaco, an alternative BLSD management strategy excluding mancozeb and other non-EU-approved active substances. A preliminary phytosanitary diagnostic was performed across several plantations to identify the most suitable pilot site (data not presented). The study was conducted from April 2024 to April 2025 in a commercial banana plantation located in the Zona Bananera (Magdalena, Colombia), a lowland humid tropical region characterized by stable high temperatures (27–29 °C) and a marked dry season from December to April. The plantation is divided into two operational units (i.e. two farms) with similar soils (sandy to loamy, neutral to slightly acidic pH, low salinity) and identical agronomic practices. The Farm 1 (84.9 ha) served as the conventional control while the Farm 2 (94.2 ha) was designated as the pilot farm to implement the biological forecasting strategy. Both farms are structured into cableway-delimited production blocks and employ dedicated field teams, allowing direct comparison of phytosanitary, agronomic and economic performance between the two management strategies.

### **Fungicide selection and resistance assessment**

In the conventional control farm (Farm 1), fungicide types and doses followed the standard spray program currently used in the plantation. In the pilot farm (Farm 2), fungicides were selected only from active ingredients authorized in the EU and were applied within the limits of the approved reference dose; mancozeb and all non-EU-approved substances were therefore excluded such as fenpropimorf (morpholine),

isopyrazam (SDHI), or epoxiconazole (triazole). Moreover, only fungicides without evidence of high resistance in local *P. fijiensis* populations were retained, as determined through the resistance evaluation protocol described below:

Sampling was carried out in 2024. Thirty banana plants were randomly selected within the Farm 2 plot, and thirty leaf pieces (25 × 25 cm) bearing stage 2–3 of *P. fijiensis* lesions according to Fouré (1988) were collected and brought to the laboratory. Single-conidium isolates were obtained from well-defined stage 2 lesions, with a maximum of three isolates retained per leaf, resulting in a final population of 22 strains. Fungicide resistance was evaluated based on mycelial growth inhibition using optical density measurements, following a method adapted from Chong *et al.* (2021). Isolates were grown on PDA for 10 days, and mycelial suspensions were prepared for liquid growth assays in 96-well microplates using PDB medium amended or not with different concentrations of fungicides. Growth was measured after 7 days at 25°C by spectrophotometry (690 nm, Tecan). Three fungicide families were tested across concentration gradients as follows: Triazoles (Demethylation Inhibitors (DMI)): difenoconazole and propiconazole (0, 0.004, 0.016, 0.04, 0.16, 0.64, 2.56, 10.24 mg·L<sup>-1</sup>); Benzimidazoles (Methyl Benzimidazole Carbamates (MBC)): thiabendazole (0, 0.1, 1, 10, 100 mg·L<sup>-1</sup>); Strobilurins (Quinone outside Inhibitors (QoI)): azoxystrobin (0.03, 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 100 mg·L<sup>-1</sup>). For DMI fungicides, IC<sub>50</sub> values were calculated for each isolate and compared to the mean IC<sub>50</sub> of a susceptible reference population (never exposed to fungicides) in order to calculate a resistance factor (RF), defined as:  $RF = \text{Average IC}_{50} \text{ plantation population} / \text{Average IC}_{50} \text{ of reference population}$ . For MBC and QoI fungicides, isolates were classified as resistant based on their ability to grow at  $\geq 1$  mg·L<sup>-1</sup> and  $\geq 10$ –100 mg·L<sup>-1</sup>, respectively. The proportion of resistant isolates within the sampled population was then determined.

### Disease monitoring and decision support strategy

In the pilot farm 2, BLSD was managed using a biological forecasting strategy developed by CIRAD (Fouré & Ganry, 2008). This approach relies on weekly monitoring of epidemiological, biological, and climatic parameters to guide fungicide applications according to epidemic risk. For this purpose, two observation plots were established in Farm 2 (Farm 2.1 and Farm 2.2), and in the conventional control Farm 1 (Farm 1.1 and Farm 1.2). Each observation plot consisted of 10 marked plants at the same physiological stage (minimum 5 functional leaves) monitored weekly until flowering, after which observation plots were renewed by selecting a next cohort of plants.

The biological information recorded consisted of the following indicators as presented by De Lapeyre De Bellaire *et al.* (2024): (i) the stage of evolution of the

disease (SED), calculated from lesion stages on leaves 2 to 4 combined with leaf emission rate (Fouré & Ganry, 2008); (ii) the youngest leaf bearing streaks (YLSt), used as an indicator of incubation duration (de Lapeyre de Bellaire et al., 2010); (iii), the youngest leaf spotted (YLS), used to estimate the total epidemic cycle duration (de Lapeyre de Bellaire *et al.*, 2010); (iv) the number of functional leaves at flowering (NLF), assessed on 20 newly flowering plants; (v) the number of functional leaves at harvest (NLH), assessed on 20 plants ready for harvest; and (vi) a lesion density score (D+), corresponding to the number of leaves exhibiting more than 50 lesions during SED assessment, with a maximum possible score of 30 for 10 plants on leaves 2, 3, and 4 (Fouré & Ganry, 2008).

Each week, the indicators measured in the Farm 2 observation plots were analyzed alongside rainfall data recorded locally, and treatment decisions were made jointly by CIRAD and Tecbaco to determine whether a fungicide application was required and to select the appropriate product (type and dose). Farm 1 observations were recorded for comparison only and did not influence its conventional spray schedule, made by the company itself. All fungicide applications within each farm were carried out on the same day by aerial spraying.

### **Evaluation of the performance of the strategy**

The performance of the phytosanitary strategy was evaluated using a set of indicators monitored throughout the year.

Phytosanitary status was assessed through the number of occurrences where the stage of evolution of the disease (SED) exceeded 1500, the number of high lesion density observations ( $D^+ > 10$ ), the number of plots with an average number of functional leaves at harvest ( $NLH \leq 5$ ), and the percentage of “risky bunches” harvested from plants bearing less than three functional leaves (a functional leaf is defined as a leaf with more than 1/3 of green area), recorded at packing stations.

The intensity and nature of fungicide applications were quantified using the Treatment Frequency Index ( $TFI = \Sigma [(applied\ dose \times treated\ area) / (reference\ dose \times cultivated\ area)]$ ), the total quantity of active ingredient applied ( $kg\ a.i \cdot ha^{-1} \cdot year$ ), the total number of treatments, the percentage of non-EU-approved fungicides used, and the total volume of mineral oil applied ( $L \cdot ha^{-1}$ ).

Agronomic performances were evaluated using production data from the producer, including yield ( $20\text{-kg}\ boxes \cdot ha^{-1}$ ), average bunch weight (kg), and fruit grade (percentage of fingers above the quality threshold defined by the company). Yield performance was expressed as the ratio of the yield obtained during the study

year to the mean yield over 2019–2023 (yield performance =  $\text{yield}_{\text{study}} / \text{yield}_{2019-2023 \text{ mean}}$ ). The same approach was used for bunch weight (bunch weight performance =  $\text{bunch weight}_{\text{study}} / \text{bunch weight}_{2019-2023 \text{ mean}}$ ).

Post-harvest quality was assessed through weekly quality scores at destination ripening rooms in France (data not shown) and by quantifying the proportion of cartons exhibiting deficient green life (GL). In Colombia, GL was evaluated weekly on bananas harvested at 10, 11, and 12 weeks after flowering in both farms. For each age class and farm, the third hand of 16 bunches was sampled, and two clusters of six fingers per hand were packed in either *Politubo* (perforated) or *Banavac* (sealed) bags. All clusters were treated with gibberellic acid ( $1.5 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ ) prior to packing. Boxes were stored in a refrigerated container ( $13 \text{ }^\circ\text{C}$ ) and inspected twice per week. Green life was determined by detecting the onset of climacteric ripening through tactile detection of loss of firmness and visual scoring; a box was classified as ripe when at least one cluster exhibited climacteric onset. According to company specifications, green life was considered deficient when  $\text{GL} < 25$  days for *Politubo* and  $\text{GL} < 33$  days for *Banavac*.

Economic evaluation was limited to compared costs associated with fungicides and aerial spraying.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Fungicide resistance

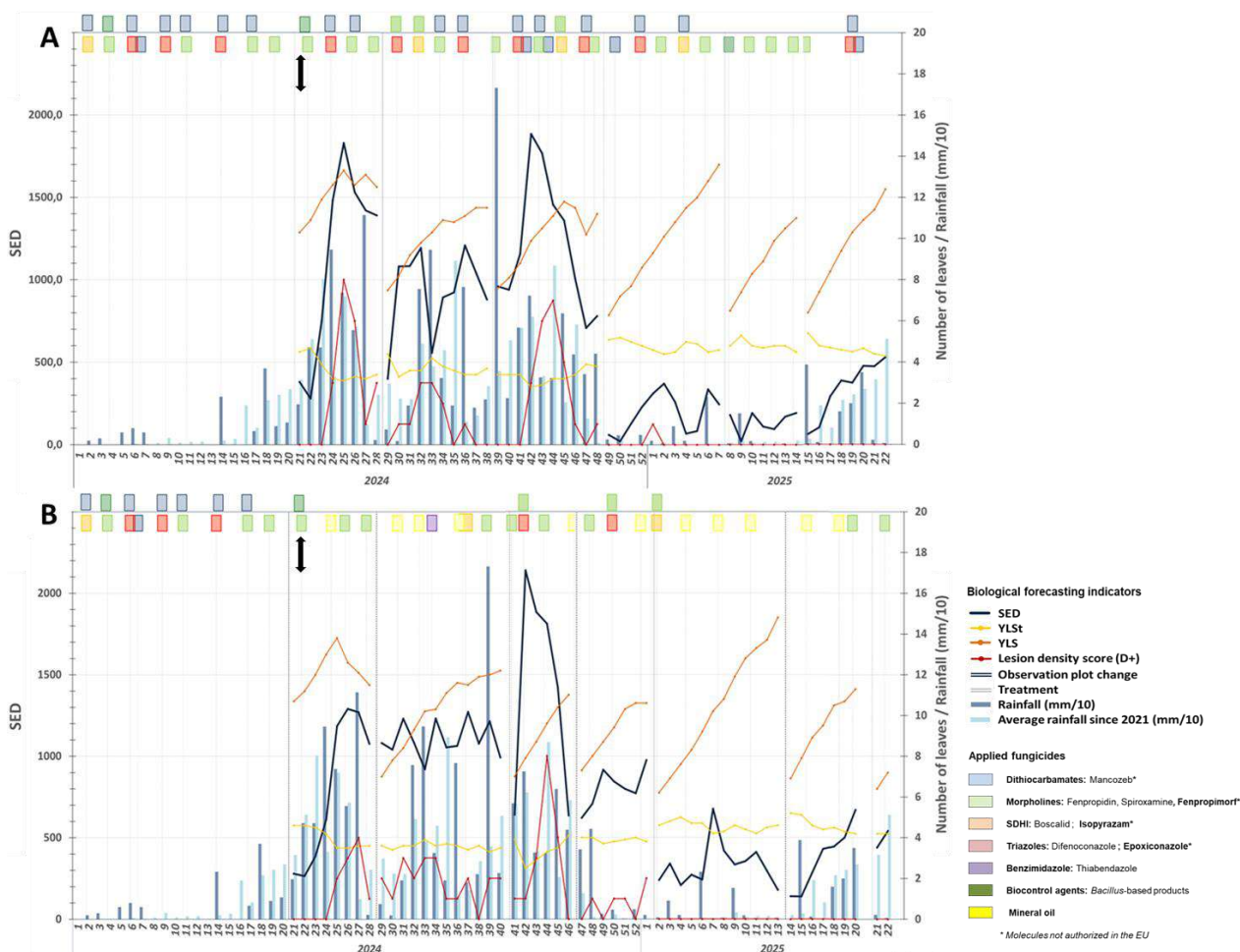
Fungicide sensitivity analysis showed contrasted resistance patterns. A majority of isolates (59 %) were resistant to azoxystrobin, confirming that QoI fungicides are no longer suitable in this context. In contrast, all isolates (100 %) were sensitive to thiabendazole, suggesting that benzimidazoles remain effective and could be integrated into the control strategy, particularly since they are not currently used in the studied plantations, thus limiting the risk of pre-existing resistance.

For triazoles, which are subject to quantitative resistance, propiconazole showed a marked shift toward high  $\text{IC}_{50}$  values, with 55 % of isolates in the  $3\text{--}7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  range and one isolate  $>15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and a high RF of 107, indicating resistance levels incompatible with effective field use; it was therefore excluded from the strategy. Difenoconazole also exhibited elevated  $\text{IC}_{50}$  values, with 46 % of isolates in the  $0.6\text{--}1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  class, 41 % above  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and a RF of 84, reflecting reduced sensitivity. Given its role as one of the few systemic fungicides remaining effective, difenoconazole was retained but with strict limitations, not exceeding 2-3 applications per year to avoid further resistance selection.

Overall, these results considerably narrow the range of systemic fungicides available for BLSD control under the biological forecasting strategy. This reinforces the need for careful alternation with non-selective products, including a broad use of SBI Group 2 fungicides (morpholines, e.g., fenpropidin) and the use of mineral oil alone (12 L/ha), which provides a light curative effect generally lasting less than two weeks (Delatouche *et al.*, 2022). In addition, strict limitation of triazoles (difenoconazole; maximum 2–3 applications per year), SDHI fungicides (boscalid; maximum 2–3 applications per year), and the integration of benzimidazoles (thiabendazole; maximum 2–3 applications per year) as a valuable complementary option within the limits of the formulations currently available in Colombia is required.

To compare disease dynamics under the two management strategies, several epidemiological indicators were monitored throughout the study period (Figure 1). A peak in disease pressure between weeks 40 and 45 was reflected in both farms by a marked increase in the SED, and important densities of inoculum were observed on the youngest banana leaves. Consequently, the proportion of plants reaching harvest with five or fewer functional leaves increased, reaching up to 50% in both the pilot and control plantations (data not shown). This indicates that the seasonal rise in BLSD pressure affected the farms similarly under both management strategies.

### Disease monitoring



**Figure 1.** Graphical representation of indicators monitored between April 2024 and April 2025 on (A) observation plot 1 of Farm 1, representing the conventional treatment strategy, and (B) observation plot 1 of Farm 2, representing the biological forecasting-based strategy. A black double arrow marks the start of the trial, and the phytosanitary treatment sequence is shown by colored squares at the top of each graph, each color corresponding to a different product family as indicated in the legend.

**Table 1.** Comparison of performance indicators between Farm 1 (control) and Farm 2 (pilot).

	<b>Indicator</b>	<b>Farm 1 (Control)</b>	<b>Farm 2 (Pilot)</b>	<b>Relative change (Farm 2 vs Farm 1)</b>
<b>Phytosanitary performance</b>	EE > 1500 (occurrence)	8 % (7/92)	10 % (9/92)	<i>negligible</i>
	High lesion density (D+ > 10)	0 % (0/92)	1.1 % (1/92)	<i>negligible</i>
	NLH ≤ 5 at harvest	1.3 % (2/150)	2.0 % (3/150)	<i>negligible</i>
	Risky bunches (≤ 3 functional leaves)	0 % (1/1500)	0.1 % (2/1500)	<i>negligible</i>
<b>Fungicide application intensity</b>	Treatment Frequency Index (TFI)	35.2	14.0	<b>-60 %</b>
	Active ingredient use (kg a.i./ha/year)	21.4	4.7	<b>-78 %</b>
	Number of aerial applications	24	20	<b>-17 %</b>
	Use of non-EU-approved fungicides	18/36 (50 %)	2/23(8.7%)	<b>-89 %</b>
	Mineral oil use (L/ha/year)	202	220	<b>+9 %</b>
<b>Agronomical performance</b>	Yield performance (boxes/ha)	99 %	93 %	<b>-6 %</b>
	Bunch weight performance	97 %	94 %	<b>-3 %</b>
	Deficient grade standard (%)	0 %	0 %	<b>0 %</b>
<b>Quality performance</b>	Deficient green life politubo (%)	39 %	40 %	<b>+3 %</b>
	Deficient green life banavac (%)	27 %	10 %	<b>-63 %</b>
	Deficient green life (%)	33 %	27 %	<b>-18 %</b>
<b>Economic performance</b>	Cost of products (\$COP/ha)	<i>c.d.*</i>	<i>c.d.</i>	<b>-38 %</b>
	Cost of spraying flights (\$COP/ha)	<i>c.d.</i>	<i>c.d.</i>	<b>-31 %</b>

\**c.d.*: Confidential data

### Performance of the strategy

Phytosanitary monitoring showed that disease pressure remained under control in both farms throughout the year (Table 1; Figure 1). The occurrence of high disease evolution values (EE > 1500) was similar between strategies (10% in Farm 2 vs. 8% in Farm 1), and high lesion density events (D+ > 10) were rare in both cases (1 vs. 0 %). Likewise, the proportion of plants reaching harvest with fewer than five functional leaves (NLH ≤ 5) and the percentage of “risky bunches” (≤3 functional leaves at harvest) remained very low in both farms (<2%), indicating that the alternative strategy did not compromise fruit physiological maturity.

In terms of fungicide use, the contrast between strategies was substantial (Table 1). The Treatment Frequency Index (TFI) was reduced by 60 in the pilot farm 2 (14.0 vs. 35.2 in Farm 1), and the annual quantity of active ingredient applied decreased by 78% (4.7 vs. 21.4 kg a.i ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>). This reduction is mainly attributable to the elimination of mancozeb and the increased use of mineral oil alone, explaining why

the total number of applications remained similar despite the strong decrease in chemical load. Furthermore, the use of active substances not approved in the EU dropped by 89%, demonstrating significant progress towards regulatory compliance. It is important to note that the two applications recorded in Farm 2 were not intentional but resulted from an operational error in the treatment preparation process.

The partial economic evaluation revealed a substantial reduction in phytosanitary treatment costs under the alternative strategy (Table 1). Using the control Farm 1 as a reference, the total treatment cost in the pilot Farm 2 was reduced by approximately 36%. This reduction was primarily driven by the lower volume of fungicide products required as well as a decrease in the number of aerial spray operations. Product costs per hectare decreased by -38%, while aerial application costs decreased by -31%. These results demonstrate that the forecasting-based strategy not only reduces chemical inputs but also provides a potential economic benefit.

Agronomic performance did not differ between the two farms throughout the evaluation period (Table 1). Yield, bunch weight, and fruit size followed similar trends under both management strategies, with no sustained decline in the pilot farm. Fruit caliber was preserved, as only one bunch in each farm failed to meet the minimum grade standard.

Post-harvest performance was assessed through green life (GL) tests and export quality evaluations (Table 1). The proportion of boxes not meeting the minimum storage duration was similar under politubo packaging (38% in Farm 1 vs. 43% in Farm 2), while banavac packaging showed fewer at-risk boxes in the pilot farm (11% vs. 29%). However, these values likely overestimate risk due to repeated container openings during the GL test. Export quality control (data not shown) confirmed comparable fruit behavior during ripening in both farms and total the absence of premature ripening in all shipments of both farms.

## CONCLUSION

Under the conditions of this evaluation, disease management using this forecasting-based strategy proved to be as effective as the conventional approach based on mancozeb applications in the adjacent control plantation. The Treatment Frequency Index (TFI) was reduced by 60% (14 vs. 35), and the amount of active ingredients applied decreased by 78% (4.7 kg of active ingredient/ha/year compared to 21.4 kg/ha/year in the conventional strategy). The number of active substances not approved in the EU was reduced by 89% (2 vs. 18), and treatment costs (fungicides products and aerial application) were reduced by 36%. In parallel, key indicators of disease pressure,

fruit quality, and yield were comparable between the two management strategies. These promising results obtained during this first year encouraged the continuation of the project, with the objective of significantly scaling up the implementation of the biological forecasting strategy to much larger areas.

## REFERENCES

- Castelan FP, Abadie C, Hubert O, Chilin-Charles Y, de Lapeyre de Bellaire L, and Chillet M. 2013. Relation between the severity of Sigatoka disease and banana quality characterized by pomological traits and fruit green life. *Crop Protection* 50, 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.02.019>
- Castelan FP, Saraiva LA, Lange F, de Lapeyre de Bellaire L, Cordenunsi BR and Chillet M. 2012. Effects of Black Leaf Streak Disease and Sigatoka Disease on fruit quality and maturation process of bananas produced in the subtropical conditions of southern Brazil. *Crop Protection*, 35, 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.08.002>
- Chong P, Essoh JN, Arango Isaza RE, Keizer P, Stergiopoulos I, Seidl MF, Guzman M, Sandoval J, Verweij PE, Scalliet G, Sierotzki H, de Lapeyre de Bellaire L, Crous PW, Carlier J, Cros S, Meijer HJG, Peralta EL and Kema GHJ. 2021. A worldwide analysis of reduced sensitivity to DMI fungicides in the banana pathogen *Pseudocercospora fijiensis*. *Pest Management Science* 77(7), 3273–3288. <https://doi.org/10.1002/ps.6372>
- de Lapeyre de Bellaire L, Fouré É, Abadie C and Carlier J. 2010. Black Leaf Streak Disease is challenging the banana industry. *Fruits* 65(6), 327–342. <https://doi.org/10.1051/fruits/2010034>
- de Lapeyre de Bellaire L, Wyvekens A, Asara S, Ouattara M, Pugeaux A, Carlier J, Pagès C, and Normand A. 2024. Control of black leaf streak disease without mancozeb in commercial plantations of Ivory Coast. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia / Acorbat Journal of Technology and Science*, 1(1). <https://doi.org/10.62498/ARTC.2430>
- Delatouche L, de Lapeyre de Bellaire L and Tixier P. 2022. Disentangling the factors affecting the dynamics of *Pseudocercospora fijiensis*: Quantification of weather, fungicide, and landscape effects. *Phytopathology*. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-22-0132-R>
- Fouré É. 1988. Stratégies de lutte contre la cercosporiose noire des bananiers et des plantains provoqués par *Mycosphaerella fijiensis* Morelet. L'avertissement biologique au Cameroun. Évaluation des possibilités d'amélioration. CIRAD. <http://agritrop.cirad.fr/419623/>
- Fouré É and Ganry J. 2008. A biological forecasting system to control Black Leaf Streak disease of bananas and plantains. *Fruits* 63(5), 311–317. <https://doi.org/10.1051/fruits:2008029>
- Ganry J, de Lapeyre de Bellaire L and Mourichon X. 2008. A biological forecasting system to control Sigatoka disease of bananas and plantains. *Fruits* 63(6), 381–387. <https://doi.org/10.1051/fruits:2008038>
- Ganry J, Fouré É, de Lapeyre de Bellaire L and Lescot, T. 2012. An integrated approach to control the Black Leaf Streak Disease (BLSD) of bananas while reducing fungicide use and environmental impact. In D. Dhanasekaran (Ed.), *Fungicides for Plant and Animal Diseases*. InTech. <https://doi.org/10.5772/29794>
- Guillermet C, Le Guen R, Fouré É, Céspedes C and de Lapeyre de Bellaire L. 2014. Adaptation of the forecasting system to control Black Leaf Streak Disease of banana in the specific conditions of the Dominican Republic. *Fruits* 69(4), 261–278. <https://doi.org/10.1051/fruits/2014016>

## Eficacia del fungicida biorracional BS6 como alternativa para mancozeb en programas para control de Sigatoka negra (*Pseudocercospora fijiensis*)

René MedinaValdez<sup>1\*</sup>, Marco V. Blanco<sup>2</sup>, Luis Grandes Román<sup>3</sup>, Angelo Albuja<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Director Estratégico, Corporación Grandes, <sup>2</sup>Consultor internacional independiente en Banano, <sup>3</sup>CEO Corporación Grandes,

<sup>4</sup>Director de Investigación, NINDALGO

\*Autor de correspondencia:

René MedinaValdez  
rmedina@grupograndes.com

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**  
MedinaValdez R, Blanco MV, Grandes Román L, Albuja A. 2026. Eficacia del fungicida biorracional BS6 como alternativa para mancozeb en programas para control de Sigatoka negra (*Pseudocercospora fijiensis*). *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 107 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26107>

### RESUMEN

La severidad de Sigatoka negra (*Pseudocercospora fijiensis*), la pérdida de sensibilidad a fungicidas sistémicos y la probable restricción por LMR's (Límite Máximo de Residuos) de Mancozeb ha motivado la evaluación de fungicidas biorracionales como BS6 que contiene Lupunina, alcaloide que se extrae de la planta (*Lupinus mutabilis*) como alternativa para controlar la enfermedad. Este estudio fue realizado en Quevedo, Ecuador en la estación lluviosa del 2024. Se trabajó con un diseño de bloques completos al azar, tres repeticiones y cuatro plantas evaluadas por repetición en parcelas con 180 m<sup>2</sup>, protegidas por barreras de pasto King Gras. En el estudio se evaluó la respuesta del fungicida BS6 a tres dosis de aceite Banole (3.79, 5.67 y 7.57 L ha<sup>-1</sup>) y su eficacia como sustituto de Mancozeb. Las variables evaluadas fueron: Índice de severidad, hojas totales, hojas funcionales, hoja más joven con estrías, hoja más joven con manchas y el área foliar afectada en porcentaje. Se realizó la prueba Fisher para comparar medias entre tratamientos y su relación con la eficacia en el control de los síntomas de la enfermedad con una significancia del 5 % ( $\alpha = 0.05$ ). BS6 responde eficazmente a 1.0 L ha<sup>-1</sup> y mejora su desempeño a mayor dosis de aceite. Los resultados mostraron que no hay diferencia estadística significativa cuando BS6 fue utilizado como sustituto de Mancozeb en rotaciones típicas de la zona.

**Palabras clave:** BS6, Mancozeb, Sigatoka negra, Biorracional, Lupunina

### ABSTRACT

Severity of black Sigatoka (*Pseudocercospora fijiensis*), loss of sensitivity to systemic fungicides and the probable restriction by MRL's (Maximum Residue Limit) have prompted the evaluation of biorational fungicides such as BS6, which contains Lupinine an alkaloid extracted from the plant (*Lupinus mutabilis*) as an alternative for disease control. It was carried out in Quevedo, Ecuador during the rainy season of 2024. A randomized complete block design was used, with three replications and four evaluated plants per plot. Each plot measured 180 m<sup>2</sup> and was protected by King Gras barriers to prevent drift. In phase one, the combination of two doses of the product (1.0 and 2.0 L ha<sup>-1</sup>) and the study evaluated the response of the fungicide BS6 to three doses of Banole oil (3.79, 5.67 and 7.57 L ha<sup>-1</sup>) and its effectiveness as a substitute for Mancozeb. The variables evaluated were: Severity index, total leaves, functional leaves, younger leaf with stretch marks, younger leaf with spots and the affected leaf area in percentage. The Fisher test was performed to compare averages between treatments and their relationship with the effectiveness in controlling the symptoms of the disease with a significance of 5% ( $\alpha = 0.05$ ). BS6 performed best at 1.0 L ha<sup>-1</sup> with the highest oil dose. No significant differences were found when replacing Mancozeb in local rotation schemes.

**Keywords:** BS6, Mancozeb, Black Sigatoka, Biorational, Lupunina



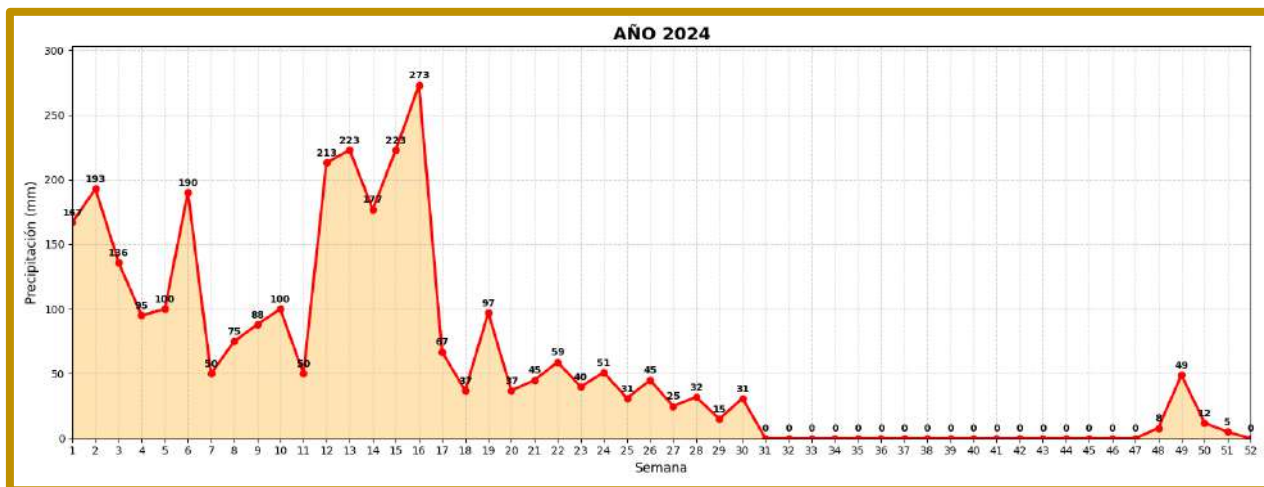
## INTRODUCCIÓN

Una de las principales causas de pérdida de peso y productividad en el cultivo de Banano es la enfermedad de la Sigatoka Negra causada por el patógeno (*Paracercospora fijiensis*). El grupo de trabajo de la FRAC (Fungicide Resistance Action Committee) sugiere en su minuta del año 2018 que la eficacia sostenible de los fungicidas puede lograrse con un cuidadoso manejo que permita evitar que el hongo desarrolle resistencia. Luego del anuncio de la Comisión Europea en octubre del 2020 de no renovar la autorización de uso del Mancozeb para los estados miembros y la posibilidad de la restricción por LMR's (Límite Máximo de Residuos) o la extensión de la prohibición del fungicida en los países productores ha provocado preocupación general en los diferentes actores de la industria ante la posibilidad de no contar con esta herramienta para la prevención de la pérdida de sensibilidad de los fungicidas sistémicos. La FRAC en el 2024 reconoció que los fungicidas biológicos pertenecen a la clase BM01 y BM02 y teniendo reportes de eficacia comprobada de estos fungicidas que pueden ser utilizados solos o como acompañantes de las moléculas tradicionales y que no tienen restricción en el número de usos lo que motivó la evaluación de productos biorracionales como el BS6 que contiene Lupunina, alcaloide quinolizidínico de origen natural que se encuentra en semillas y plantas aéreas de la planta *Lupinus mutabilis* como alternativa para el reemplazo parcial o total de Mancozeb en estrategias para control de la enfermedad. BS6 es un biofungicida que posee múltiples modos de acción, entre los que se pueden citar están: Desestabilización de la pared celular del hongo, los alcaloides degradan componentes clave como la quitina y los  $\beta$ -1,3-glucanos, debilitando la estructura del patógeno; Inhibición de procesos vitales: impide la germinación de esporas y el avance de las lesiones provocadas por el hongo; Activación de defensas naturales: promueve la división celular y la regeneración foliar, ayudando a la planta a recuperarse del daño; Acción preventiva y curativa: suprime colonias existentes y evita nuevas infecciones.

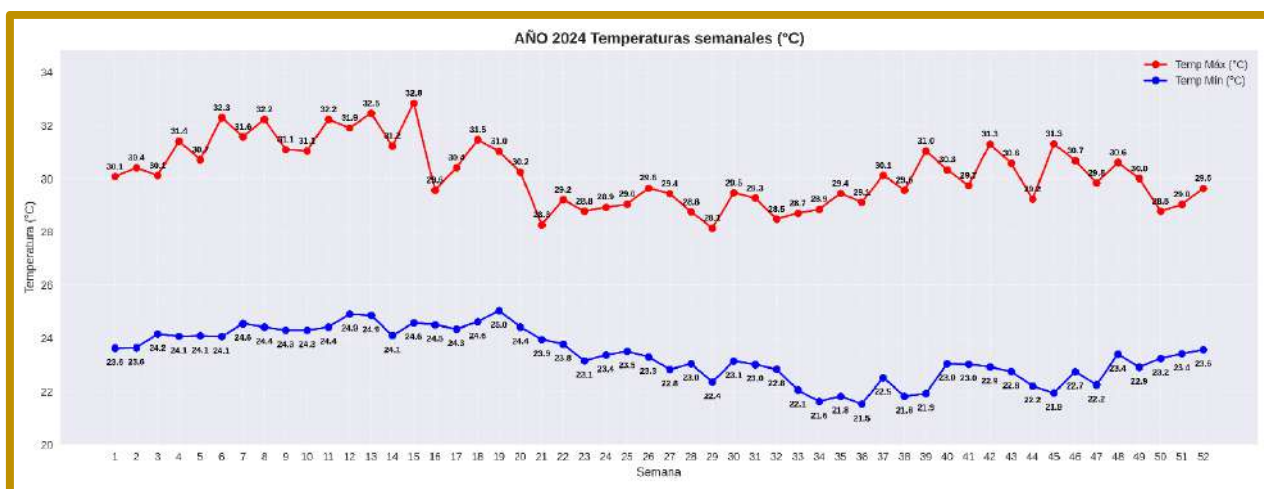
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación

El ensayo se realizó en la zona Bananera de Quevedo, en la estación experimental del Dr. Marco Vinicio Blanco con georreferenciación de: Latitud (S 0° 59' 12.0") y Longitud: (W 79° 26' 38.7"), altitud de 5 m s. n. m., precipitación promedio de 2600 mm y humedad relativa promedio de 90 %. La evaluación se realizó durante la estación lluviosa del año 2024 donde hubo una precipitación acumulada de 3.039 mm como se puede apreciar en la Figura 1 y con un promedio de temperatura máxima de 30.2 °C y 23.4 °C ilustrado en la Figura 2.



**Figura 1.** Precipitación acumulada anual año 2024 en la estación experimental Marco Blanco.



**Figura 2.** Promedio de temperaturas máxima y mínima en °C año 2024 en la estación experimental Marco Blanco.

### Equipo de aplicación

Se utilizó una bomba de motor marca Solo 423 equipada con bomba centrífuga y un Micronair AU-800 controlando el tamaño y distribución de las gotas para simular la aplicación aérea.

### Diseño experimental y análisis estadístico

Se realizó un diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones y cuatro plantas evaluadas por repetición. Los bloques tuvieron un área de 180 m<sup>2</sup> (12 X 15 m), protegidos por barreras de pasto King Gras para evitar la deriva entre ellos. Por el tamaño pequeño de muestra se utilizó la prueba de Fisher para comparar las medias

entre los tratamientos de los diferentes fungicidas y su relación con la eficacia en el control de los síntomas provocados por la enfermedad. El análisis se realizó con un nivel de significancia del 5 % ( $\alpha = 0.05$ ). Se consideraron diferencias estadísticamente significativas cuando  $p < 0.05$ .

### Tratamientos

**Cuadro 1.** Descripción de los tratamientos evaluados.

EVALUACIÓN FUNGICIDA BIORRACIONAL BS6			
TTO.*	PRODUCTOS	DOSIS kg ha <sup>-1</sup>	OIL L
1	TESTIGO ABSOLUTO	NA **	NA
2	OIL (Emulsión)	0.00	7.57
3	BS6 + AGUA	1.00	0
4	BS6 + OIL ***	1.00	3.79
5	BS6 + OIL	1.00	5.67
6	BS6 + OIL	1.00	7.57
7	BS6 + OIL+CEP****	1.00	3.79
8	DITHANE 60 SC + OIL	1.75 +1.00	3.79

\*TTO.: Tratamiento, \*\*NA: No aplica, \*\*\*OIL: Aceite agrícola mineral paraafínico, \*\*\*\*CEP: Cera de estearina de palma.

Se realizaron diez aplicaciones. El volumen de agua por hectárea fue de 23 litros y se utilizó emulsificante al 1 %. Las variables evaluadas fueron: Índice de severidad basada en la escala de Stover modificada por Gahul<sup>4</sup>: **II**, Hojas totales: **TH**, Hojas funcionales: **HF** (Grado 2 de Stover, hojas con máximo 5 % de área foliar afectada: AFA medida en porcentaje). Hoja más joven con estrías: **YLI**. Hoja más joven con manchas: **YLS**, Área foliar afectada en porcentaje: **AFA**. Para todas las variables evaluadas se analizó el Área bajo la curva: **ABC** porque permite analizar la evolución de la enfermedad considerando la severidad de esta.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de las diez aplicaciones se obtuvieron los resultados que siguen a continuación.

**Cuadro 2.** Área bajo la curva. Significancia al 5 % de probabilidad ( $p < 0.05$ ).

EVALUACIÓN DE FUNGICIDA BIORRACIONAL BS6									
TTO.*	PRODUCTOS	DOSIS kg ha <sup>-1</sup>	OIL L	II	TH	HF	YLI	YLS	AFA
1	TESTIGO ABSOLUTO	NA	NA	1638 E	441 B	318 D	242 D	311 C	719 D
	OIL (Emulsión)	0,00	7,57	1189 C	477 A	384 AB	286 AB	369 A	323 B
2	BS6 + AGUA	1,00	0	1381 D	444 B	346 C	264 C	338 B	555 C
3	BS6 + OIL	1,00	3,79	1108 BC	443 B	371 B	284 AB	358 A	318 B
4	BS6 + OIL	1,00	5,67	997 B	441 B	376 B	286 AB	365 A	178 A
5	BS6 + OIL	1,00	7,57	1013 B	457 AB	393 AB	291 A	377 A	171 A
6	BS6 + OIL+CEP****	1,00	3,79	1013 B	439 B	378 B	280 B	364 A	173 A
7	DITHANE 60 SC + OIL	1,75 +1,00	3,79	869 A	438 B	404 A	289 A	373 A	89 A

Para el índice de infección existieron diferencias estadísticas favorables al tratamiento con Mancozeb, para esta variable los tratamientos de BS6 más aceite fueron mejores que solo aceite y el testigo absoluto. Para la variable total de hojas, el BS6 más aceite a dos galones y el de aceite en emulsión mostraron ser superiores que los demás. En el caso de las hojas funcionales los tratamientos de BS6 con mayor dosis de aceite, el que tuvo la cera de estearina de palma y el Dithane mostraron mayor eficacia. En lo que respecta al YLI, YLS y el AFA el desempeño de BS6 a mayor dosis de aceite no muestra diferencias significativas con Dithane, siendo superiores al de solo aceite y el testigo absoluto.

### CONCLUSIONES

El fungicida biorracional BS6 demostró tener efectos positivos para el control de la enfermedad de la Sigatoka negra, (*Paracercospora fijiensis*).

El producto BS6 mostró mejor respuesta al incremento en las dosis de aceite agrícola mineral.

Cuando se sustituyó un galón de aceite y se agregó un litro de cera de estearina de palma el BS6 mostró que puede mantener un control similar de la enfermedad comparado con el tratamiento con mayor dosis de aceite.

Considerando los resultados al finalizar este estudio se puede concluir que BS6 utilizado como alternativa para sustituir MANCOZEB en rotaciones típicas de la zona prácticamente no tuvo diferencias estadísticas significativas.

## REFERENCIAS

- Fungicide Resistance Action Committee. 2018. FRAC Mode of Action Classification 2018. CropLife International: <https://www.frac.info/media/2qrehfff/banana-wg-meeting-minutes-2018-english.pdf>.
- Anonymous, 2020. Commission Implementing regulation (EU) 2020/2087 of 14 December 2020 concerning the non-renewal of the approval of the active substance mancozeb, in accordance with Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council concerning the placing of plant protection products on the market and amending the Annex to Commission Implementing Regulation (EU) No 540/2011. Official Journal of the European Union.
- Carr C, Villalobos R, Villalta R y Chaves N. 2021. Evaluación semi-comercial de la eficacia biológica del fungicida botánico Pluviam 6 OL para el combate de la Sigatoka negra (*Pseudocercospora fijiensis*, sin. *Mycosphaerella fijiensis*) en el cultivo del banano (*Musa AAA*). [Informe final de investigación sin publicar]. Corporación Bananera Nacional, Costa Rica.
- Gauhl F. 1989. Epidemiology and Ecology of Black Sigatoka (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) on Plantain and Banana (*Musa* spp.) in Costa Rica, Central America. Inibap. Translated from German (1989) by Jend M., 1994.

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

Natalia E. Molina Quesada<sup>1\*</sup>, Gabriel Solano Maroto<sup>2</sup>, Joheny Solano Maroto<sup>3</sup>, Lizzy Retana Villalobos<sup>4</sup>, Gilberto Masís Solano<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Gerente de RDI y Regulatorio de BioVENKO, <sup>2</sup>Supervisor de Finca Experimental, <sup>3</sup>Directora de PhytoLab, <sup>4</sup>CEO de Biotech CR GRM, <sup>5</sup>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<sup>-1</sup>), *S. aureofaciens* (750 g ha<sup>-1</sup>), la mezcla (*Trichoderma* spp. 250 g ha<sup>-1</sup> + *S. aureofaciens* 500 g ha<sup>-1</sup>) 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<sup>-1</sup>), *S. aureofaciens* (750 g ha<sup>-1</sup>), the mixture (*Trichoderma* spp. 250 g ha<sup>-1</sup> + *S. aureofaciens* 500 g ha<sup>-1</sup>), 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



## 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. ( $2 \times 10^9$  UFC/g) y otro a base de *S. aureofaciens* ( $1 \times 10^9$  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* ( $375 \text{ g ha}^{-1}$ ), un bioinsumo formulado con el actinomicete *S. aureofaciens* ( $750 \text{ g ha}^{-1}$ ), un tratamiento combinado de ambos productos ( $250 + 500 \text{ g ha}^{-1}$ , respectivamente) y un comparativo con solo aceite mineral ( $3,0 \text{ L ha}^{-1}$ ); todos los tratamientos, excepto el testigo absoluto, se aplicaron en mezcla con aceite agrícola

(3,0 L ha<sup>-1</sup>), con un volumen de aplicación de 23 L ha<sup>-1</sup>. 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 Stover modificada por Gauhl (ecuación 1) del boletín de CORBANA, número 16 (Marín y Romero, 1992):

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

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 ( $p \leq 0,05$ ) (Cuadro 1, Cuadro 2), con excepción de la variable HT, cuya interacción tratamiento  $\times$  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

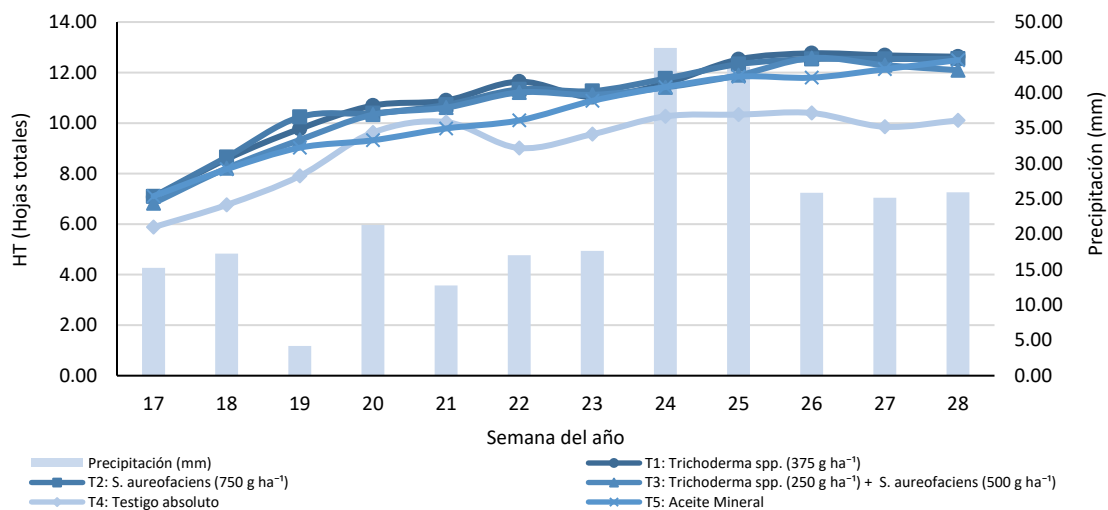
**Cuadro 2.** Agrupación estadística de medias para variables foliares según la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) y medida promedio de la variable respuesta para los tratamientos *Trichoderma* spp. ( $375 \text{ g ha}^{-1}$ ) (tratamiento 1), *S. aureofaciens* ( $750 \text{ g ha}^{-1}$ ) (tratamiento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

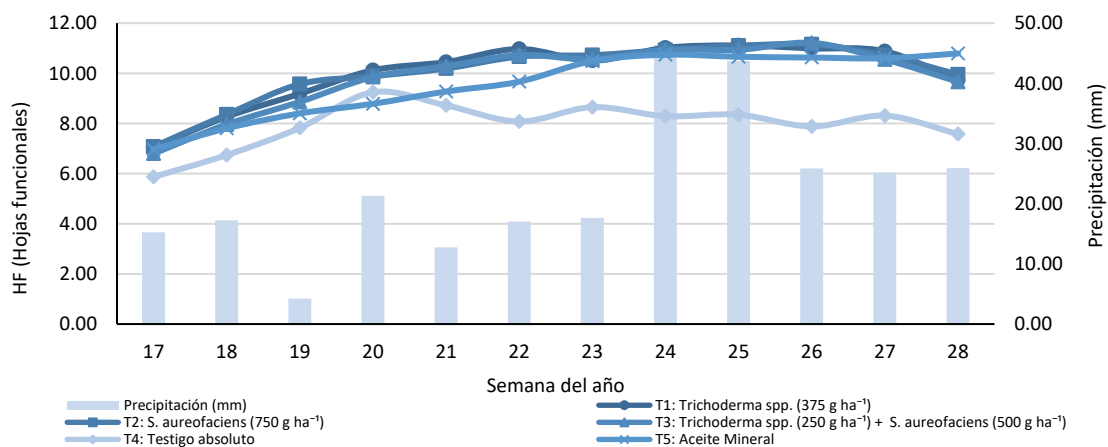
En conjunto, los resultados demuestran que los tratamientos con biocontroladores ejercieron un efecto regulador significativo sobre el desarrollo de la Sigatoka negra, reflejado en valores superiores de hojas totales, hojas funcionales y hoja más joven con mancha en comparación con el testigo absoluto 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).

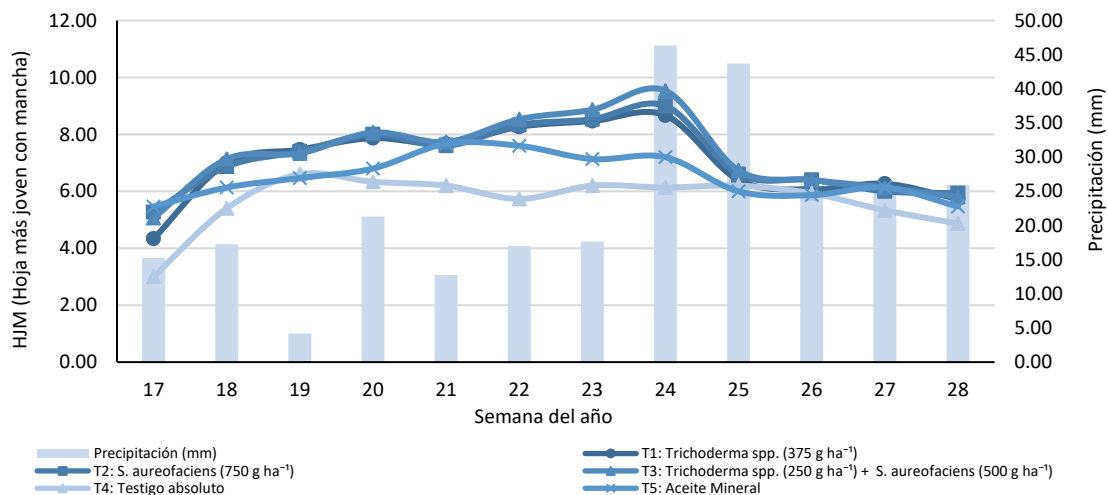
**A**



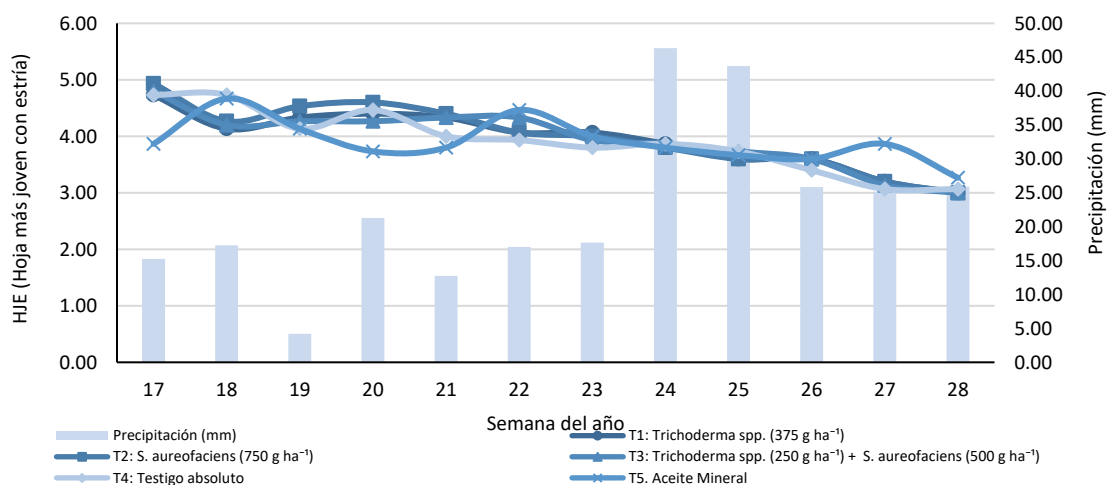
**B**



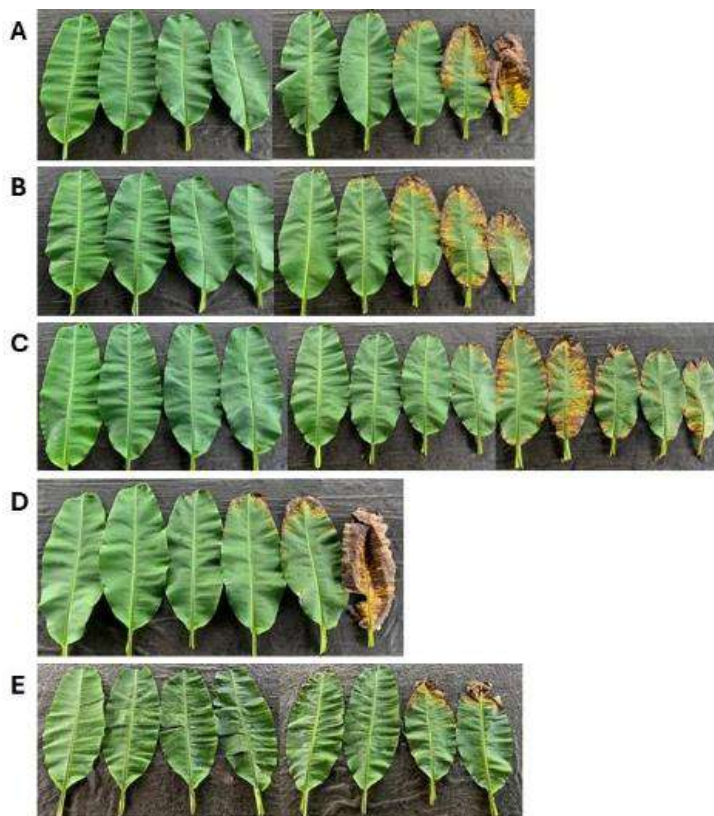
C



D



**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. ( $375 \text{ g ha}^{-1}$ ), B. a base de *S. aureofaciens* ( $750 \text{ g ha}^{-1}$ ), C. combinado de ambos productos ( $250 + 500 \text{ g ha}^{-1}$ , 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<sup>-1</sup>) (tratamiento 1), *S. aureofaciens* (750 g ha<sup>-1</sup>) (tratamiento 2), combinado de ambos productos (250 + 500 g ha<sup>-1</sup>, 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.

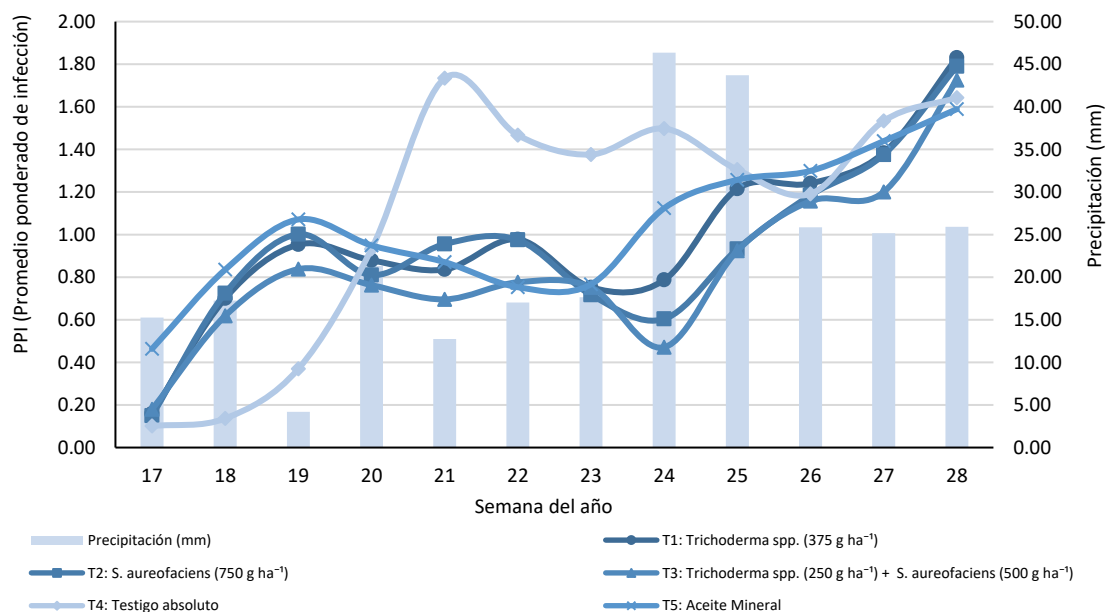
**Cuadro 6.** Agrupación estadística de medias para la variable del promedio ponderado de infección según la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) y medida promedio de la variable para los tratamientos *Trichoderma* ( $375 \text{ g ha}^{-1}$ ) (tratamiento 1), *S. aureofaciens* ( $750 \text{ g ha}^{-1}$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

Tratamiento	Promedio ponderado de infección	
1	$0,98 \pm 0,06$	B
2	$0,93 \pm 0,14$	BC
3	$0,84 \pm 0,14$	C
4	$1,11 \pm 0,12$	A
5	$1,03 \pm 0,21$	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<sup>-1</sup>), B. a base de *S. aureofaciens* (750 g ha<sup>-1</sup>), C. combinado de ambos productos (250 + 500 g ha<sup>-1</sup>, 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*.

## Compatibilidad funcional de extractos alcalino-atmosféricos de *Ascophyllum nodosum* canadiense con fungicidas utilizados en el control de *Pseudocercospora fijiensis* (*Mycosphaerella fijiensis*)

Christian J. Pérez O.<sup>1\*</sup>, Edwin A. Morales<sup>1</sup>, Cleiton J. Alves<sup>1</sup>, Marcos Bettini<sup>1</sup>, David O. Chacón<sup>1</sup>, Lina M. Castaño<sup>1</sup>,  
Diego, A. Calderón<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Acadian Seaplants Limited, 30 Brown Ave, Dartmouth, NS B3B 1X8, Canadá.

**\*Autor de correspondencia:**

Christian J. Pérez O.  
cperez@acadian.ca

**Contribución:**

Artículo Científico

**Sección:**

Fitosanidad

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Pérez C, Morales E, Alves C, Bettini M, Chacón D, Castaño L y Calderón D. 2026. Compatibilidad funcional de extractos alcalino-atmosféricos de *Ascophyllum nodosum* canadiense con fungicidas utilizados en el control de *Pseudocercospora fijiensis* (*Mycosphaerella fijiensis*). *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 109 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26109>

### RESUMEN

Este estudio evaluó la compatibilidad física-química y la eficacia *in vitro* de mezclas de extractos alcalinos de *Ascophyllum nodosum* al 20 % de materia seca (ANE A) y al 29 % de materia seca (ANE B) con fungicidas DMI (difenoconazol e isopirazam) y fenpropidin usados en el manejo integrado de la Sigatoka Negra en banano. Se prepararon soluciones de mezclas de bioestimulante (1, 5 y 10 %) y fungicida (0,1 y 10 mg L<sup>-1</sup>), se midieron pH y presencia de precipitados tras una hora y se determinó la EC<sub>50</sub> y la inhibición del tubo germinativo de *Pseudocercospora fijiensis*. Las mezclas no mostraron antagonismo y alcanzaron inhibiciones de 70–97 % comparables entre el fungicida solo y las mezclas con bioestimulante, respaldando su compatibilidad funcional en condiciones controladas *in vitro*.

**Palabras clave:** Sensibilidad *in vitro*, Extracto de algas, Bioestimulantes, Sostenibilidad

### ABSTRACT

This study evaluated the physicochemical compatibility and *in vitro* efficacy of mixtures of alkaline extracts of *Ascophyllum nodosum* at 20% dry matter (ANE A) and 29% dry matter (ANE B) with DMI fungicides (difenoconazole and isopyrazam) and fenpropidin used in the integrated management of Black Sigatoka in bananas. Mixtures containing 1, 5 y 10% biostimulant and 1,0 y 10 mg L<sup>-1</sup> fungicide were prepared; pH and precipitate formation were assessed after one hour, and EC<sub>50</sub> and germ tube inhibition of *Pseudocercospora fijiensis* were determined. The mixtures showed no antagonism and achieved 70–97 % inhibition values comparable to the fungicides alone, supporting its functional compatibility under controlled *in vitro* conditions.

**Keywords:** *In vitro* sensitivity, Seaweed extract, Biostimulants, Sustainability



## INTRODUCCIÓN

*Pseudocercospora fijiensis*, agente causal de la Sigatoka negra, constituye una de las principales amenazas fitosanitaria en el cultivo de banano a escala global, con presencia reportada en 74 países distribuidos en cuatro continentes (EPPO, 2022). La enfermedad compromete significativamente la productividad del cultivo, no solo por sus efectos directos sobre la fisiología de la planta y el rendimiento, sino también por los altos costos que implica su control fitosanitario, de hasta 35 dólares estadounidenses por hectárea y por semana para mantener niveles adecuados de control en Colombia (Augura, 2023). Para Ecuador, país líder en exportaciones, se han estimado pérdidas del 20 % en el peso del racimo durante la temporada lluviosa y de hasta un 6 % en época seca debido al impacto de esta enfermedad (Terrero *et al.*, 2020).

El manejo químico convencional de *Pseudocercospora fijiensis* en banano se basa en el uso rotacional o en mezcla de fungicidas con distintos mecanismos de acción, entre los que destacan los inhibidores de la desmetilación (DMI) como el difenoconazol e isopirazam, así como las estrobilurinas como el fenpropidín, perteneciente al Grupo 7 del FRAC. No obstante, la eficacia de estas moléculas se puede ver comprometidas por la aparición de cepas del patógeno con sensibilidad reducida o resistencia cruzada, resultado del uso intensivo y repetido de estos principios activos. Esta situación ha generado una preocupación creciente en la industria bananera y ha llevado a que el monitoreo continuo de la sensibilidad fúngica a estos productos sea considerado una herramienta esencial para el diseño de estrategias de manejo fitosanitario integrado y sostenible (Pérez-Vicente, 2012).

Por otra parte, través de análisis de composición química (Valverde *et al.*, 2022) y metabolómica (Craigie *et al.*, 2008) se ha determinado que el proceso utilizado para elaborar un extracto es una variable importante para definir su composición y consistencia, encontrando que los extractos alcalinos de *Ascophyllum nodosum* (100 % puros) muestran perfiles consistentes de compuestos bioactivos asociados a la inducción de defensas vegetales, con ventajas comparativas frente a otras especies de algas como *Ecklonia maxima* y *Sargassum*. Debido a estas características y efectos bioactivos únicos, estos bioestimulantes actúan como elicitores eficaces que promueven el crecimiento vegetal, fortalecen las defensas frente al estrés abiótico y modulan el microbioma (Ali *et al.*, 2021), compatible con la gestión integrada y sostenible del cultivo de banano.

Finalmente, a pesar de que la mezcla de fungicidas con bioestimulantes es una práctica potencialmente sostenible (Ali *et al.*, 2021), aún no se ha evaluado de manera integral la compatibilidad físico-química ni su efecto sobre la eficacia *in vitro* de estas

mezclas frente a *Pseudocercospora fijiensis*. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo demostrar la compatibilidad funcional y estabilidad física-química en tanque de mezclas entre extractos alcalinos de *Ascophyllum nodosum* (ANE A y ANE B) y los fungicidas difenoconazol, isopirazam y fenpropidin, como verificación técnica bajo condiciones controladas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los extractos comerciales ANE A y ANE B se obtuvieron mediante extracción alcalina-atmosférica bajo la metodología exclusiva propiedad de Acadian Seaplants Limited, Canadá. Para la prueba de sensibilidad *in vitro* se emplearon los protocolos de la Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB, 2025). El inóculo consistió en ascosporas de *Pseudocercospora fijiensis* extraídas de pseudotecios recolectados en Antioquia (Colombia). Para la obtención del inóculo se utilizaron subcultivos frescos del hongo, incubados durante 15–20 días a 26 °C en medio PDA. A partir de estos cultivos se recolectó micelio, el cual fue macerado y fragmentado en presencia de agua estéril. La suspensión resultante se filtró para obtener fragmentos de micelio uniformes y posteriormente se ajustó, mediante una cámara de Neubauer, a una concentración final de  $2 \times 10^5$  fragmentos de micelio/mL.

El montaje del ensayo fue en microplacas de 96 pozos, en cada pozo se adicionaron 100  $\mu$ L de medio Sabouraud, 50  $\mu$ L de inóculo y 50  $\mu$ L de las mezclas en evaluación, obteniendo un volumen final de 200  $\mu$ L por pozo. Las placas se incubaron a 27 °C  $\pm$  2 durante 15 días. Cada pozo se consideró una réplica independiente, evaluándose un total de cinco réplicas. El crecimiento se determinó espectrofotométricamente en un lector de ELISA, midiendo la absorbancia a 595 nm al tiempo cero y a los quince días de incubación. A partir de los valores obtenidos se calcularon la media, la desviación estándar, el porcentaje de inhibición y la EC<sub>50</sub>, todos referidos al control.

La prueba incluyó tratamientos con fungicida solo en concentraciones de 1,0 mg L<sup>-1</sup> para difenoconazol (250 g L<sup>-1</sup>); de 10 mg L<sup>-1</sup> de isopirazam (125 g L<sup>-1</sup>) y 1,0 mg L<sup>-1</sup> de fenpropidin (750 g L<sup>-1</sup>) y mezclas de los extractos (ANE A y ANE B) en proporciones de 1 %, 5 % y 10 % (v/v) más el fungicida.

La compatibilidad físico-química de tanque entre los extractos ANE A / ANE B y los fungicidas se evaluó en condiciones controladas, preparando mezclas en agua a dosis comerciales (ANE A 0,75 L ha<sup>-1</sup>; ANE B 0,5 L ha<sup>-1</sup>; difenoconazol 0,5 L ha<sup>-1</sup>; isopirazam 0,6 L ha<sup>-1</sup>; fenpropidin 0,6 L ha<sup>-1</sup>), con agitación mecánica (IKA RW-20,

825 rpm) hasta completar un volumen proporcional equivalente a 23 L ha<sup>-1</sup> de mezcla final en triplicado.

La estabilidad se monitoreó a los 0, 5, 15, 30, 45 y 60 minutos post-mezcla. Además del pH y la presencia de precipitados, se incorporaron parámetros de compatibilidad: estabilidad de emulsión, evaluada visualmente por separación de fases y presencia de anillos oleosos o sobrenadantes; floculación y/o coagulación, registrada por formación de grumos, agregados, flóculos o sedimentación y cambios de viscosidad, estimados por el comportamiento de flujo comparativo de la mezcla recién mezclada y en reposo (incremento evidente de espesamiento, gelificación o pérdida de fluidez).

Se consideró mezcla compatible cuando no se observaron separación de fases persistente, floculación/coagulación, sedimentación relevante o incremento marcado de viscosidad durante el periodo de 60 minutos, y cuando el pH se mantuvo estable dentro del rango operacional observado para cada mezcla.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

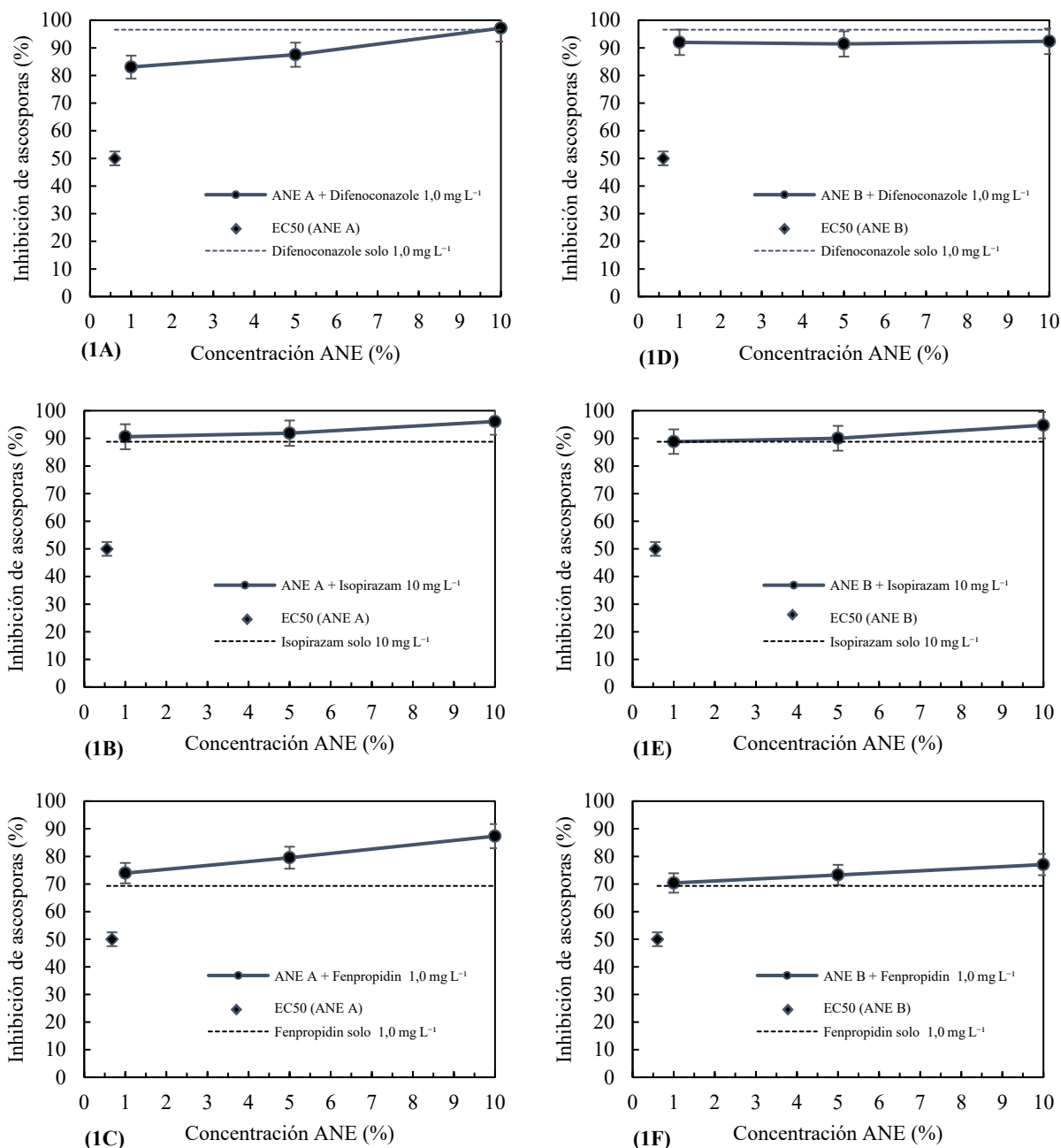
En la evaluación *in vitro* de la eficacia antifúngica (Figura 2) difenoconazol solo (1,0 mg L<sup>-1</sup>) obtuvo 96,56 % mientras que la combinación ANE A 10 % + difenoconazol (1,0 mg L<sup>-1</sup>) alcanzó una inhibición del 97,12 % con una EC<sub>50</sub> de 0,602 % de extracto; la mezcla ANE B 10 % + difenoconazol (1,0 mg L<sup>-1</sup>) obtuvo un 92,37 % de inhibición y una EC<sub>50</sub> de 0,543 % de extracto. Con isopirazam solo (10 mg L<sup>-1</sup>) se determinó 88,77 %, mientras que la mezcla ANE A al 10 % produjo una inhibición del 96,10 % (EC<sub>50</sub> = 0,551 %) y ANE B al 10 % alcanzó el 94,75 % (EC<sub>50</sub> = 0,563 %). En el caso de fenpropidin solo (1 mg L<sup>-1</sup>) se reportó 69,31 %, y la mezcla con ANE A al 10 % mostró una inhibición del 87,33 % (EC<sub>50</sub> = 0,676 %), mientras que la combinación con ANE B al 10 % resultó en un 77,05 % de inhibición (EC<sub>50</sub> = 0,715 %).

Los resultados confirman que ANE A y ANE B no antagonizan la actividad fungicida manteniendo inhibiciones  $\geq 70$  %. Ali *et al.*, (2021), señala que los extractos de algas marinas no solo promueven el crecimiento y desarrollo vegetal, sino que también, se caracterizan por su alta compatibilidad con diversos insumos agrícolas, incluidos fertilizantes y agroquímicos, lo que permite su integración efectiva en esquemas modernos de manejo agrícola sostenible, además se han demostrado, que estos bioestimulantes conservan su eficacia biológica incluso cuando se aplican en combinación con otros productos, respaldando su uso funcional en programas

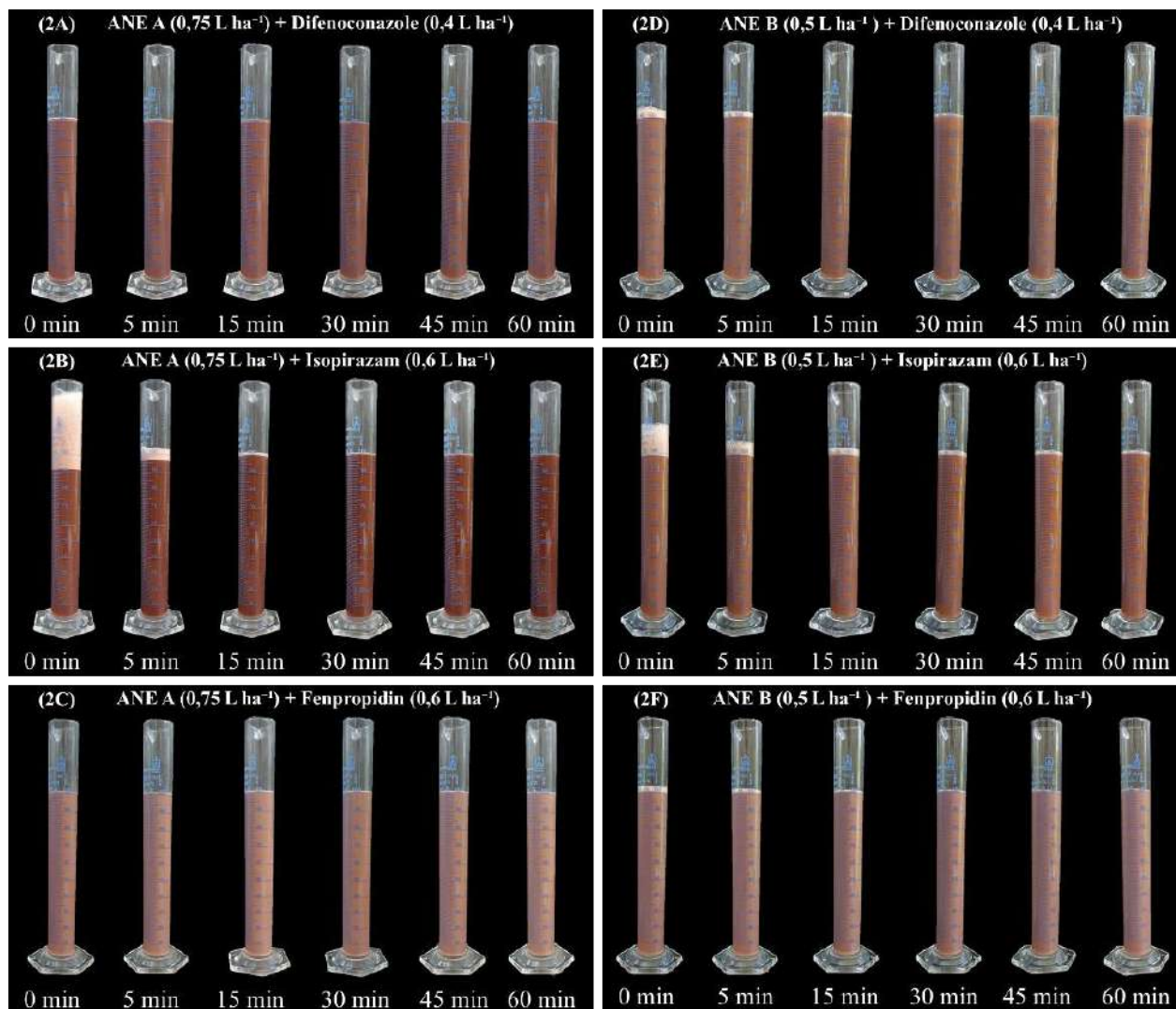
integrados de manejo fitosanitario sin comprometer su actividad fisiológica ni la de los fungicidas asociados.

En la compatibilidad fisico-química (Figura 2), en ningún tiempo de evaluación (0–60 minutos) se registraron señales de separación de fases, floculación ni cambios apreciables de viscosidad; las mezclas permanecieron homogéneas bajo reposo y no presentaron sedimentación relevante, no se observó una variación de pH (6,6 a 7,6 con ANE A y 8.1 a 8,4 con ANE B) o precipitación significativos en las mezclas, corroborando la aptitud para aplicación conjunta, en un volumen comúnmente utilizado en el cultivo de banano de 23 L ha<sup>-1</sup>.

Pessoa *et al.* (2024) realizaron un estudio que evaluó la compatibilidad fisico-química entre diferentes clases de productos agrícolas incluyendo fungicidas y biostimulantes cuando se mezclan en soluciones para aplicación foliar. Estos autores, examinaron parámetros como presencia de floculación, sedimentación, separación de fases, formación de grumos y pH, utilizando concentraciones recomendadas y agitación continua. Los resultados reportaron que la compatibilidad depende del tiempo de reposo, la agitación y las características de cada formulación, y que en ciertas condiciones la mezcla permanece estable durante al menos 30 minutos tras su preparación. Esto es muy importante a considerar en cuanto a aplicaciones aéreas donde el periodo entre preparación de la avioneta y llegada al cultivo debe asegurar una estabilidad de al menos una hora en ciertos casos.



**Figura 1.** Representación de la concentración efectiva media (EC50) y porcentaje de inhibición de ascosporas con la aplicación *in vitro* de fungicidas difenoconazol (1,0 mg L<sup>-1</sup>) isopirazam (10 mg L<sup>-1</sup>) y fenpropidin (1 mg L<sup>-1</sup>) en mezcla con los bioestimulantes (A, B, C) ANE A y (D, E, F) ANE B en concentraciones de 1, 5 y 10 %. Los valores corresponden a la media de cinco pozos independientes por tratamiento (n = 5). Las barras de error representan un 5 % del valor medio. La línea horizontal discontinua indica el 50 % de inhibición. Las líneas conectan los puntos únicamente para facilitar la visualización de la tendencia.



**Figura 2.** Estabilidad de mezclas en solución hasta 60 minutos de los fungicidas difenoconazol (0,5 L ha<sup>-1</sup>), isopirazam (0,6 L ha<sup>-1</sup>) y fenpropidin (0,6 L ha<sup>-1</sup>) en mezcla con los bioestimulantes (A, B, C) ANE A 0,75 L ha<sup>-1</sup> y (D, E, F) ANE B 0,5 L ha<sup>-1</sup>. La estabilidad de las mezclas se evaluó de forma visual a los 0, 5, 15, 30, 45 y 60 minutos (min) posteriores a la preparación, considerando la presencia de precipitación, separación de fases, floculación y cambios aparentes de viscosidad. No se observaron alteraciones visibles durante el periodo evaluado. Los resultados corresponden a tres preparaciones independientes por tratamiento (n = 3).

## CONCLUSIONES

Los extractos alcalinos de *Ascophyllum nodosum* (ANE A y ANE B) mostraron compatibilidad funcional *in vitro* con los fungicidas difenoconazol, isopirazam y

fenpropidin de Syngenta®, al no evidenciarse antagonismo en la actividad antifúngica frente a *Pseudocercospora fijiensis*. Las mezclas evaluadas mantuvieron niveles de inhibición comparables a los fungicidas aplicados de forma individual, lo que indica que la presencia de los extractos no interfirió con la respuesta del patógeno bajo las condiciones del bioensayo. En las pruebas de compatibilidad físico-química en tanque, las mezclas permanecieron estables hasta 60 minutos después de su preparación, sin observarse precipitación, separación de fases, floculación ni cambios apreciables de viscosidad, y con valores de pH que se mantuvieron dentro de rangos operativos para cada mezcla. Estos resultados confirman la estabilidad física de las mezclas en condiciones controladas de laboratorio, dentro del intervalo temporal evaluado. Los hallazgos obtenidos se limitan a condiciones *in vitro* y a pruebas de compatibilidad físico-química, por lo que no permiten inferir efectos agronómicos, fisiológicos o de eficacia en campo. Estudios adicionales en condiciones de campo serán necesarios para evaluar el desempeño biológico y agronómico de estas mezclas bajo escenarios productivos reales.

## REFERENCIAS

- Ali O, Ramsubhag A, and Jayaraman J. 2021. Biostimulant Properties of Seaweed Extracts in Plants: Implications towards Sustainable Crop Production. *Plants*, 10(3), 531. <https://doi.org/10.3390/plants10030531>
- Augura. 2023. Coyuntura bananera 2023. <https://augura.com.co/wp-content/uploads/2022/04/COYUNTURA-BANANERA-2023.pdf>
- CIB. 2025. Informe Pruebas de Sensibilidad de *Pseudocercospora fijiensis* frente a diferentes tratamientos (Reporte No. 2024003). Corporación para Investigaciones Biológicas.
- Craigie JS, MacKinnon SL and Walter JA. 2008. Liquid seaweed extracts identified using 1H NMR profiles. *J Appl Phycol* 20, 665–671. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9232-1>
- EPPO. 2022. *Pseudocercospora fijiensis* (MYCOFI). <https://gd.eppo.int/taxon/MYCOFI/distribution>
- García Munguía AM, García Munguía A, Acosta Ramos M, García Munguía O, Orozco Santos M, Ibarra Juárez LA y García Munguía CA. 2022. Sensibilidad *in vitro* de *Pseudocercospora fijiensis* (Morelet) a los fungicidas sistémicos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 117–125. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.1.117>
- Pérez Vicente L. 2012. A Holistic Integrated Management Approach to Control Black Sigatoka Disease of Banana Caused by *Mycosphaerella fijiensis* (Technical Manual TCP/SLC/3402). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Pessoa PH, Silva HA, Lima LS, Assis RB, Neres NA, Almeida JC and Andrade CLL. 2024. Chemical characteristics and compatibility of mixtures at different agricultural application rates. *Brazilian Journal of Science*, 3(7), 89–114. <https://doi.org/10.14295/bjs.v3i7.612>

- 
- Terrero P, Peñaherrera S, Bustamante A, Cedeño G y Solórzano R. 2020. Inducción de resistencia a *Mycosphaerella fijiensis* Morelet y su relación con el rendimiento de plantas de banano (*Musa* AAA) CV. Williams. Revista Espamciencia, 11(2), 80–87. [https://doi.org/10.51260/revista\\_espamciencia.v11i2.230](https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v11i2.230)
- Valverde S, Williams PL, Mayans B, Lucena JJ and Hernández Apaolaza L. 2022. Comparative study of the chemical composition and antifungal activity of commercial brown seaweed extracts. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 1017925. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1017925>

## Evaluación del coadyuvante Exxsol™ D145 con una baja concentración de surfactantes sobre la eficacia de fungicidas en cultivos de plátano

Fabrina Gomes<sup>1\*</sup>, Nan Hu<sup>2</sup>, Caterina Tran<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Customer & Application Developer, Exxonmobil; Brazil; <sup>2</sup>Market Developer, Exxonmobil; USA. <sup>3</sup>Customer & Application Developer, Exxonmobil; USA

\*Autor de correspondencia:  
Fabrina Gomes  
fabrina.gomes@exxonmobil.com

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

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

**Cita:**  
Gomes F, Hu N, Tran C. 2026.  
Evaluación del coadyuvante  
Exxsol™ D145 con una baja  
concentración de surfactantes  
sobre la eficacia de fungicidas  
en cultivos de plátano.  
*Acorbat Revista de Tecnología  
y Ciencia* 3(1): 110  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26110>



### RESUMEN

La industria agroquímica enfrenta el desafío de optimizar las formulaciones para mejorar la eficiencia y, al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental. Los surfactantes desempeñan un papel fundamental en la mejora del desempeño de los ingredientes activos; sin embargo, su uso en concentraciones elevadas puede incrementar los costos de formulación y generar riesgos ecológicos, especialmente cuando se emplean etoxilatos de nonilfenol (NPE). En este estudio se desarrolló una formulación nueva de coadyuvante que incorpora Exxsol D145, un aceite mineral, y una baja dosis de surfactantes libres de NPE. El coadyuvante fue evaluado en combinación con diferentes fungicidas en cultivos de plátano, con el objetivo de determinar su eficacia en la protección contra la Sigatoka Negra (*Pseudocercospora fijiensis*). Los resultados preliminares indican una excelente estabilidad de emulsión y una mejora significativa en el desempeño de los fungicidas, lo que sugiere una alternativa más sostenible y eficiente para el manejo de esta enfermedad.

**Palabras clave:** Coadyuvante, Agroquímico, Sigatoka

### ABSTRACT

The agrochemical industry faces the challenge of optimizing formulations to improve efficiency while simultaneously reducing environmental impact. Surfactants play a fundamental role in enhancing the performance of active ingredients; however, their use at high concentrations can increase formulation costs and generate ecological risks, especially when nonylphenol ethoxylates (NPEs) are used. In this study, a novel adjuvant formulation was developed incorporating Exxsol D145, a mineral oil, and a low dose of NPE-free surfactants. The adjuvant was evaluated in combination with different fungicides on banana crops to determine its efficacy in protecting against Black Sigatoka (*Pseudocercospora fijiensis*). Preliminary results indicate excellent emulsion stability and a significant improvement in fungicide performance, suggesting a more sustainable and efficient alternative for managing this disease.

**Keywords:** Adjuvant, Agrochemical, Sigatoka

## INTRODUCCIÓN

Las bananas se encuentran entre las frutas más cultivadas, consumidas y comercializadas del mundo, sirviendo como una fuente alimentaria vital y un pilar económico, con exportaciones globales que superaron los 19,5 millones de toneladas en 2024 (FAO, 2025); sin embargo, su producción se ve gravemente amenazada por la Sigatoka Negra (*Pseudocercospora fijiensis*), una enfermedad foliar que puede causar pérdidas significativas de rendimiento si no se maneja adecuadamente (Arango Isaza RE *et al.*, 2016). Los fungicidas siguen siendo el tratamiento principal para controlar esta enfermedad. Mientras tanto, se requieren coadyuvantes para la aplicación de los fungicidas. Los surfactantes son componentes esenciales en las formulaciones agroquímicas porque mejoran la dispersión, humectación y penetración de los ingredientes activos (ACS, 2025). No obstante, concentraciones elevadas de surfactantes pueden aumentar los costos de formulación y plantear riesgos ecológicos, particularmente cuando se basan en etoxilatos de nonilfenol (NPE), los cuales se consideran ambientalmente persistentes, bioacumulativos, disruptores endocrinos, tóxicos para la vida acuática y regulados a nivel mundial (U.S. Environmental Protection Agency, 2010). Para abordar estos desafíos, se desarrolló una nueva formulación de coadyuvante que incorpora aceite mineral Exxsol D145, combinado con una baja dosis de surfactantes libres de NPE. El emulsionante seleccionado para este estudio fue un etoxilato de alcohol graso, elegido por su compatibilidad y rendimiento. Además, no se encontró fitotoxicidad durante la aplicación del material en los tratamientos. Se caracterizaron algunas propiedades fisicoquímicas del coadyuvante, incluyendo rango de carbono, residuo no sulfonado, contenido de azufre, contenido aromático y punto de fluidez. Este coadyuvante formulado se evaluó en combinación con diferentes fungicidas en cultivos de banano para tratar la Sigatoka Negra (*Pseudocercospora fijiensis*).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en La Rita, Guápiles, provincia de Limón, Costa Rica, en la región del Caribe. Se utilizaron plantas de segunda generación de *Musa* AAA cv. Grande Naine propagadas por cultivo de tejidos. Cada unidad experimental consistió en nueve plantas de banano dispuestas en formato de parcela, con plantas de borde de *Musa textilis* (variedad tolerante a la Sigatoka Negra) para minimizar la propagación de la enfermedad entre tratamientos.

Se implementó un diseño completamente aleatorizado con tratamientos replicados tres veces. El experimento comprendió dos fases: (i) evaluación de la estabilidad de la emulsión y (ii) evaluación en campo del control de la enfermedad.

Para las pruebas de estabilidad de emulsión (i), los tratamientos incluyeron aceite mineral Exxsol™ D145 a 7,0 L·ha<sup>-1</sup> combinado con fungicidas curativos, y aceite mineral Exxsol D145 a 2,0 L·ha<sup>-1</sup> combinado con un fungicida protector.

Los fungicidas curativos evaluados fueron spiroxamina (0,4 L·ha<sup>-1</sup>), fluxapyroxad (0,4 L·ha<sup>-1</sup>), fenpropidin (0,6 L·ha<sup>-1</sup>), difenoconazol (0,4 L·ha<sup>-1</sup>), pyrimetaniil (0,5 L·ha<sup>-1</sup>) y fenpropimorf (0,7 L·ha<sup>-1</sup>). Todas las mezclas incluyeron el fungicida protector mancozeb (1,94 L·ha<sup>-1</sup>) y un surfactante (alcohol graso etoxilado) al 1 % del volumen de aceite.

Se preparó una mezcla de 250 mL para cada prueba, manteniendo proporciones equivalentes a una aplicación comercial de 23 L·ha<sup>-1</sup>. Secuencia de mezclado:

- a) Aceite + emulsionante (3 min de agitación)
- b) 50 % de agua (3 min de agitación)
- c) Fungicida (3 min de agitación)
- d) Agua restante (3 min de agitación)

La agitación se realizó con un agitador eléctrico IKA RW-20 a 800 rpm.

La estabilidad de la emulsión se evaluó a los 0, 15, 30, 45 y 60 minutos utilizando una escala de tres puntos como se muestra en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Escala de tres puntos para estabilidad de la emulsión.

Grado	Definición
1	Emulsión estable
2	Emulsión inestable sin separación y recupera la estabilidad con leve agitación
3	Emulsión inestable con separación irreversible

Para la prueba de control de enfermedades en campo (ii), los tratamientos incluyeron:

- Aceite Exxsol D145 solo (7,0 L·ha<sup>-1</sup>)
- Programa comercial de fungicidas (CP) utilizando Exxsol D145 a 5,0–7,0 L·ha<sup>-1</sup> dependiendo del tipo de fungicida sistémico y 3,0 L·ha<sup>-1</sup> para el fungicida protector
- Control sin tratamiento

Los programas comerciales incluyeron los siguientes fungicidas: fungicidas sistémicos (fluxapyroxad, fenpropidin, difenoconazol, spiroxamina, fenpropimorf, pyrimetaniil, epoxiconazol) y protector (mancozeb) según las condiciones climáticas. Las aplicaciones se realizaron utilizando un soplador motorizado calibrado para

entregar 23 L·ha<sup>-1</sup>, simulando condiciones de aplicación aérea. El programa comercial se llevó a cabo según el cronograma en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Aplicación del programa comercial.

Aplicación n°	Semana	Fecha	Fungicida
1	35	2-Sep-23	Fluxapyroxad + Mancozeb
2	36	9-Sep-23	Fenpropidin + Mancozeb
3	37	16-Sep-23	Mancozeb
4	38	21-Sep-23	
5	39	27-Sep-23	
6	40	6-Oct-23	Difenoconazole + Mancozeb
7	41	13-Oct-23	Spiroxamine + Mancozeb
8	42	19-Oct-23	Mancozeb
9	43	25-Oct-23	
10	44	31-Oct-23	
11	45	7-Nov-23	Fenpropimorph + Mancozeb
12	46	14-Nov-23	Pyrimethanil + Mancozeb
13	47	20-Nov-23	Mancozeb
14	47	25-Nov-23	
15	48	2-Dec-23	
16	49	9-Dec-23	Epoconazole + Mancozeb

La severidad de la Sigatoka Negra se evaluó semanalmente utilizando la escala de Stover modificada por Gauhl, como se describe en el Cuadro 3.

**Cuadro 1.** Escala de Stover modificada por Gauhl.

<b>Grado</b>	<b>Descripción</b>
0	Sin síntomas de la enfermedad
1	Estrías hasta un máximo de 10 manchas
2	11 manchas hasta 5% del área foliar
3	6-15 %
4	16-33 %
5	34-50 %
6	Más de 50 %

Las evaluaciones comenzaron cuando la primera hoja tratada alcanzó la cuarta posición y continuaron cada 7 días hasta dos semanas después de la última aplicación. Las variables registradas incluyeron la hoja más joven infectada (YLI), la hoja más joven con manchas (YLS) y la severidad de la enfermedad; este artículo se centra en la severidad promedio.

El análisis estadístico se realizó con el programa INFOSTAT, utilizando una prueba de comparación múltiple (Tukey) para cada parámetro. Para el análisis estadístico, los parámetros evaluados se transformaron en Área bajo la curva (AUC). AUC es una operación matemática que representa la suma de cada parámetro evaluado entre dos fechas de evaluación, multiplicada por los días entre las evaluaciones, como la Ecuación 1:

Ecuación 1 AUC

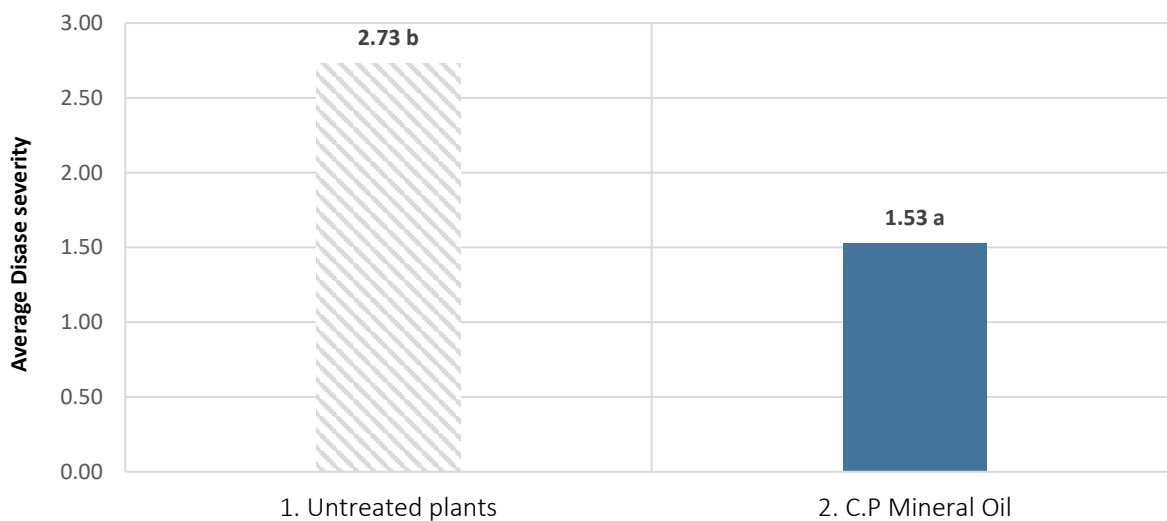
$$[(X_{\text{semana } n} + X_{\text{semana } n+1}) / 2] * \text{Days}_{\text{semana } n - \text{semana } n+1}$$

## RESULTADOS

Los resultados preliminares indican una excelente estabilidad de emulsión (Cuadro 4) y una mejora significativa en el desempeño de los fungicidas (Figura 1), lo que sugiere una alternativa más sostenible y eficiente para el manejo de esta enfermedad.

**Cuadro 4.** Resultado de estabilidad de emulsión.

Fungicide 1	Fungicide 2	Oil	0'	15'	30'	45'	60'
1.94 L/ha	--	2.0 L/ha oil	1	1	1	2	2
	0.4 L/ha Spiroxamine		1	1	1	2	2
	0.4 L/ha Fluxapyroxad		1	1	1	2	2
Mancozeb	0.6 L/ha Fenpropidin	7.0 L/ha oil	1	1	1	2	2
	0.4 L/ha Difenconazol		1	1	1	2	3
	0.7 L/ha Fenpropimorph		1	1	1	2	2
	0.5 L/ha Pyrimethanil		1	1	1	2	2



**Figura 1.** Comportamiento del adyuvante.

**Figura 2.** Parcela con tratamiento de aceite. Mes 1.



**Figura 3.** Parcela sin tratamiento de aceite. Mes 1.



**Figura 4.** Parcela con tratamiento de aceite. Mes 3.



**Figura 5.** Parcela sin tratamiento de aceite. Mes 3.



## CONCLUSIÓN

El desarrollo de una formulación adyuvante novedosa que incorpora Exxsol™ D145 y una baja dosis de surfactantes libres de NPE demostró resultados prometedores en la mejora del rendimiento de los fungicidas en cultivos de banano. Cuando se combinó con diversos fungicidas, este adyuvante exhibió excelentes resultados de estabilidad de emulsión (Cuadro 4) y redujo significativamente la severidad promedio de la enfermedad en un 44 %, como se muestra en el Gráfico 1 y Figuras 1-4, confirmando su efectividad en la protección contra la Sigatoka Negra en la formulación.

### **Agradecimientos**

Rebeca Madrigal, Ricardo Astúa; Monreri S.A.

Mariah Mendez, Brittany McArdle; Exxonmobil Baytown Lab.

David Holland, Sara Yohe; Exxonmobil Technology and Engineering Company.

Enrique Paris, Mauricio Aguirre, Berto Sanchez, Lidiane Bueno; Exxonmobil Product Solutions.

### **REFERENCIAS**

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2024. Banana Market Review. FAO Knowledge Repository. 2025.

U.S. Environmental Protection Agency. 2010. Nonylphenol (NP) and Nonylphenol Ethoxylates (NPEs) Action Plan [RIN 2070-ZA09].

Arango Isaza RE, Diaz-Trujillo C, Dhillon B, Aerts A, Carlier J, Crane CF, *et al.* 2016. Combating a Global Threat to a Clonal Crop: Banana Black Sigatoka Pathogen *Pseudocercospora fijiensis* (Synonym *Mycosphaerella fijiensis*) Genomes Reveal Clues for Disease Control. PLoS Genet 12(8): e1005876.

ACS Axial. 2025. <https://axial.acs.org/agriculture-and-food-chemistry/surfactant-chemistry-research-drives-crop-protection-innovation> . Consulta el 26 de noviembre del 2025.

## Tecnología Leci-Tech para mejorar la eficiencia de los fungicidas en Sigatoka Negra (*Pseudocercospora fijiensis*) en el cultivo de banano

Pepe M. Villela<sup>1\*</sup>, Nicolas Vaio<sup>1</sup>, Kent Lambden<sup>2</sup>, Nicole Aubert-Dobles<sup>1</sup>, Carl Austin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sr. Manager Commercial Development (Nutrien/Loveland); <sup>2</sup>Director Commercial Development International (Nutrien), USA; <sup>3</sup>Independent Researcher, Costa Rica.

**\*Autor de correspondencia:**

Pepe M. Villela  
jose.martinez-villela@nutrien.com

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

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

**Cita:**  
Martínez Villela J, Vaio N, Lambden K, Aubert-Dobles N, Austin C. 2026. Tecnología Leci-Tech para mejorar la eficiencia de los fungicidas en Sigatoka Negra (*Pseudocercospora fijiensis*) en el cultivo de banano. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 111  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26111>

### RESUMEN

La Sigatoka Negra ha ido incrementando en su presión y severidad en las diferentes regiones productoras de banano a través del mundo. Sigue siendo el mayor costo en la producción de banano y su manejo se ha complicado debido a condiciones de clima y menos productos en mercado para su control. Calibración, emulsiones, cubrimiento de hoja y aplicaciones de fungicidas deben ser reevaluados para incrementar eficiencia. Desde hace varios años el uso de aceites parafínicos ha sido el estándar para ayudar a mitigar tal enfermedad; lo que nos lleva a un incremento de aplicaciones en busca de su control para obtener un rendimiento aceptable en banano. Buscar herramientas alternativas es una necesidad real, por tanto, incluir nuevas tecnologías nos ayudaría a no depender tanto del aceite parafínico y conseguir el mismo control para Sigatoka. Por ello se evaluó una tecnología a base de lecitina de soya llamada LECITECH que la empresa Nutrien viene trabajando por más de 50 años. Esta tecnología tiene tres características; es anti-deriva, retiene la gota en hoja, e incrementa la penetración en productos sistémicos. Dentro de esta tecnología hay varias formulaciones, pero para el caso de banano se utilizó un acidificante llamado LI 700 y un aceite metilado de soya llamado MSO Lecitech. La diferencia radica que permite usar un solo producto y dosis más bajas que las requeridas por el aceite parafínico. Esta innovación constituye la base de los programas sustentables de Nutrien.

**Palabras clave:** Sigatoka negra, Control, Adyuvante

### ABSTRACT

Black Sigatoka remains a major cost in banana production, and management has become increasingly complex especially due to weather and reduced chemical availability. Core elements of the control strategy—calibration, emulsion mixing, spray coverage, and fungicide application—should be reassessed and modified with alternate profile. Black Sigatoka continues to increase across banana producing regions worldwide. For years paraffinic oils is the standard to aid on control of the disease. Yet its specific contribution to control, optimal droplet range, and residue impact remains poorly defined. Mineral-oil residues are limitations to plant growth and have a negative impact on the environment. Over the past years, achieving acceptable control has required frequent applications, while still relying on paraffinic oils. Continuous search for innovative technologies is critical to ensure future effective management of Black Sigatoka and reduce dependency on paraffinic oil without compromising results. In this context, LECITECH technology, a solution that Nutrien has successfully used for over 50 years in its retail system, was evaluated. LECITECH offers three key characteristics: drift reduction, droplet retention, and efficient penetration for systemic fungicides. There are several solutions within this technology and two of them were selected for banana. LI 700, and MSO LECITECH. with the difference in lower application rates, use of only one product instead of two (oil and emulsifier), and a vegetable oil-based formulation that has a control over Black Sigatoka. These products are part of the Sustainability tools Nutrien offers.

**Keywords:** Black Sigatoka, Control, Adyuvant

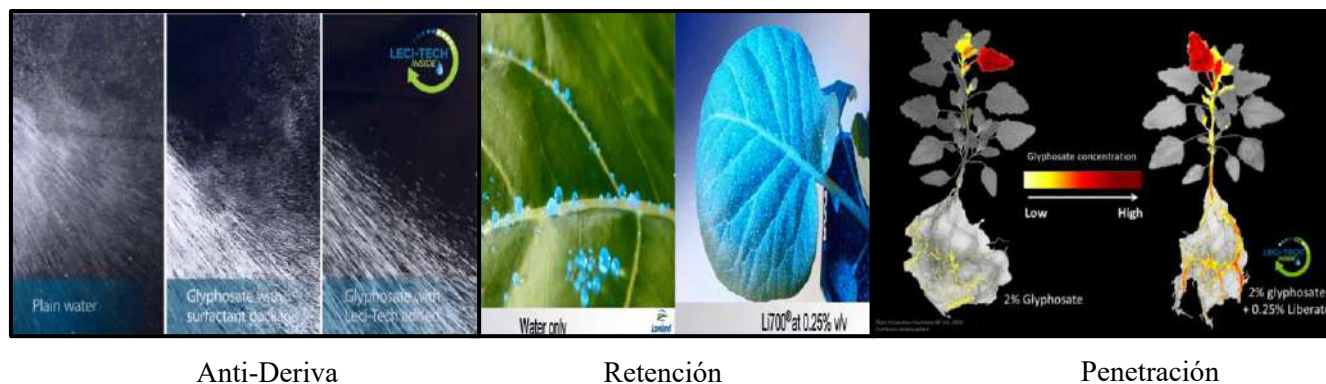


## INTRODUCCIÓN

La Sigatoka Negra ha ido incrementando en los diferentes países y también su severidad a través del mundo bananero. Desde hace varios años el uso de aceites parafínicos ha sido el estándar para ayudar a mitigar tal enfermedad; lo que nos lleva a un incremento de aplicaciones en busca de su control para obtener un rendimiento aceptable en banano. Buscar herramientas alternativas es una necesidad real, por tanto, incluir nuevas tecnologías nos ayudaría a no depender tanto del aceite parafínico y conseguir el mismo control.

Bajo este esquema con el objetivo de introducir una nueva tecnología que pueda reemplazar el aceite parafínico y darnos una nueva alternativa de control más viable y sustentable se establece el ensayo con la Tecnología LECITECH.

LECITECH es la tecnología con la cual el aceite de lecitina de soya nos da propiedades anti-deriva, retención de gota y penetración. En el cultivo de banano se utilizará LI 700 para fungicidas protectantes y MSO Lecitech para sistémicos.



**Figura 1.** Efecto 3 en 1 de la tecnología LECITECH.

El cubrimiento de la hoja con el ingrediente activo es clave para lograr eficiencia en la aplicación. La tecnología LECITECH aporta esta eficiencia al aumentar la cantidad de gotas que alcanzan la superficie foliar, mejorar la retención de las gotas (84 % frente a 50 % sin adyuvante, según estudios previos) y optimizar la penetración para productos sistémicos.

LI 700® es un coadyuvante no iónico derivado de lecitina de soya. Actúa como surfactante penetrante, reduce la deriva y ajusta el pH de la mezcla. Su formulación combina alcohol etoxilado, ácido propiónico y lecitina de soya, ofreciendo una solución eficiente para mejorar la calidad y efectividad de las aplicaciones.

MSO® CONCENTRATE CON LECI-TECH es un aceite metilado de semilla de soya que contiene emulsificantes premium junto con la tecnología LECI-TECH®, proporcionando una mezcla uniforme para mayor eficiencia en la aplicación. Ofrece beneficios como reducción de deriva, mejor penetración y adhesión de la gota en la hoja. Su composición incluye una combinación de alcohol etoxilado, aceite metilado de soya y lecitina de soya.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Entre 2024 y 2025 se establecieron varios ensayos para ver la viabilidad de la tecnología LECITECH como reemplazo de aceite parafínico.

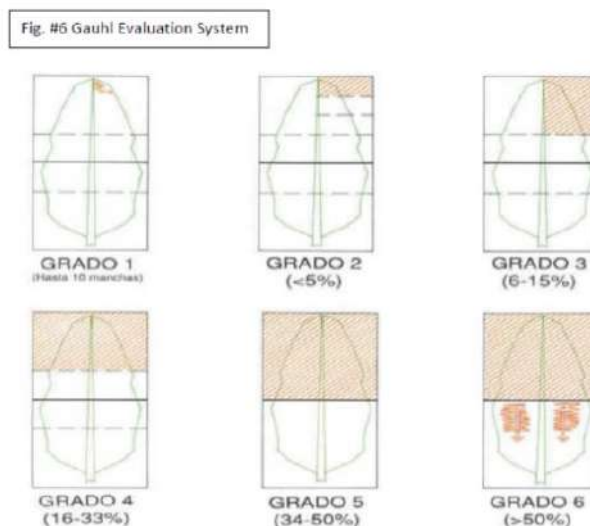
### MSO Lecitech:

MSO Lecitech está enfocado a fungicidas sistémicos. El primer ensayo se estableció en Río Frío, Costa Rica, el 07 de octubre de 2024, en un cultivo de banano (*Musa* AAA, grupo Cavendish, variedad Gran Nain). El diseño experimental correspondió a bloques completamente al azar, conformado por 5 bloques y 6 repeticiones por bloque. Las aplicaciones se realizaron en hoja simple (candela, hoja 1 y hoja 3), siguiendo el protocolo definido para evaluar la respuesta de los tratamientos descritos en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Tratamientos y dosis del ensayo de evaluación del MSO Lecitech vs aceite parafínico en aplicaciones de fungicidas sistémicos para el control de Sigatoka negra en banano.

Tratamientos	Fungicida	Adyuvante	Dosis L/ha
1	Sico	MSO Lecitech	2.66
2	Regnum	MSO Lecitech	2.66
3	Lonselor	MSO Lecitech	2.66
4	Volley	MSO Lecitech	2.66
5	Sico	Banole	8
6	Regnum	Banole	8
7	Lonselor	Banole	8
8	Volley	Banole	8
9	Control		

Las aplicaciones comenzaron en la semana 8 para un total de 9 aplicaciones al final del ensayo. Todos los tratamientos fueron aplicados con un Mist-Blower AU8000 Micronar. Calibrados a las dosis mencionadas la hoja 1 estaba visible para muestreo de infección. Los primeros parámetros de colección comenzaron en la semana 11. El análisis principal a través del ensayo es DSI (índice de Severidad de enfermedad; Gauhl 1990). Para la semana 48 final del ensayo ya se marcaba diferencias en control.



**Figura 2.** Sistema de evaluación de índice de severidad de enfermedad de acuerdo a Gauhl.

Las aplicaciones se realizaron en las a hojas 1 y 3 y se tomaron datos a través del curso del ensayo semanalmente hasta la semana 48. Los resultados fueron sometidos a análisis estadístico mediante un modelo de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de  $p < 0.05$ .



**Figura 3.** Hoja 1 y 3 en una planta de banano.

### LI 700 Lecitech

El segundo ensayo fue enfocado a la evaluación de fungicidas protectantes, utilizando el mismo sistema del ensayo de anterior con aplicaciones en hoja simple (hoja 1 y hoja 3). En esta ocasión utilizando LI 700 Lecitech a una dosis de 0.125 % v/v, con el objetivo de asegurar buena distribución del fungicida sobre la superficie de la hoja. Las lecturas finales se realizaron en la semana 24.

**Tabla 2.** Tratamientos y dosis del ensayo de evaluación del LI 700 Lecitech vs aceite parafínico en aplicaciones de fungicidas protectantes para el control de Sigatoka negra en banano.

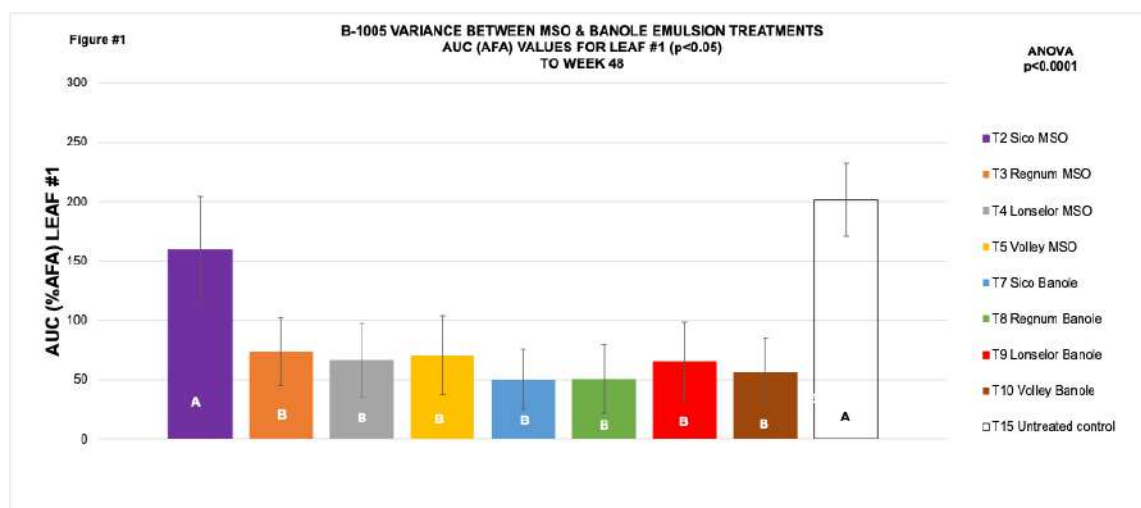
Tratamientos	Fungicida	Adyuvante	Dosis
1	Vondozeb 62 (1.69 L/ha) +Volley (0.7 L/ha)	LI 700 Lecitech	0.125 % v/v
2	Vondozeb 62 (1.69 L/ha) +Volley (0.7 L/ha)	Liberate	0.125 % v/v
3	Vondozeb 62 (1.69 L/ha) +Volley (0.7 L/ha)	MSO Lecitech	1.33 L/ha
4	Vondozeb 62 (1.69 L/ha) +Volley (0.7 L/ha)	Banole	4 L/ha
5	Control		

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### MSO Lecitech

Durante las primeras 4.5 horas posteriores a la aplicación se registró una precipitación acumulada de 22 mm. A pesar de esta condición, se obtuvieron resultados favorables en la eficacia del tratamiento. La recolección de datos se concluyó en la semana 48 para las aplicaciones de hoja 1 y hoja 3, observándose en el tratamiento control una incidencia de Sigatoka negra.

Las figuras 4 y 5 muestran claramente que no hay diferencia significativa entre los tratamientos con MSO Lecitech y con aceite parafínico (Banole + emulsificante). Con ello se muestra que MSO Lecitech es una tecnología viable para aplicaciones con fungicidas sistémicos y se recomienda como alternativa al uso de aceite parafínico en la estrategia de control de Sigatoka negra.

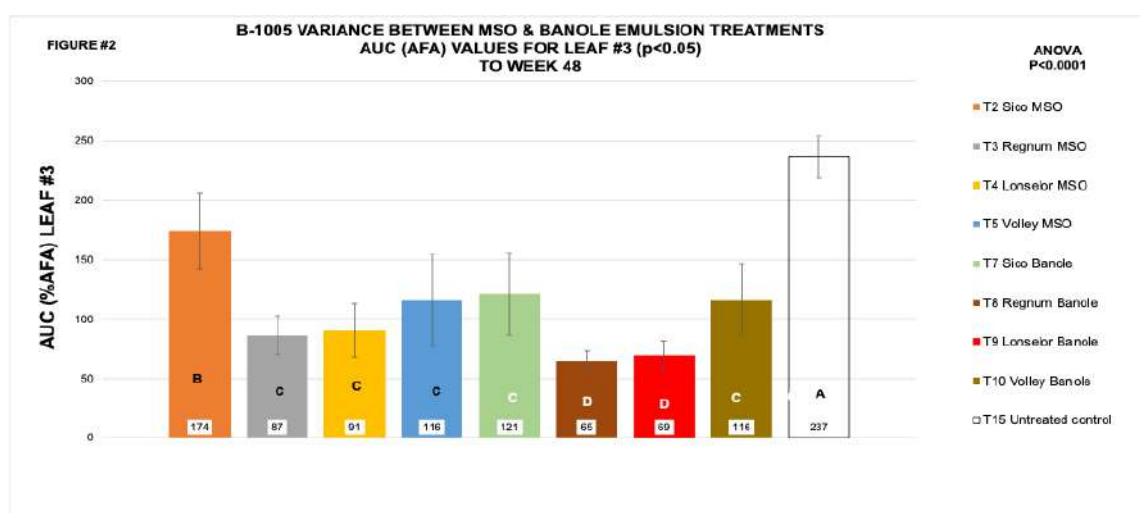


**Figura 4.** Varianza entre los tratamientos con emulsión de MSO y Banole en los valores de área bajo la curva (AUC) para la hoja 1 (p<0.05) en la semana 48.

**Tabla 3.** Análisis estadístico mediante un modelo de varianza (ANOVA) de los diferentes tratamientos en la evaluación del MSO Lecitech vs aceite parafínico en combinación con fungicidas sistémicos en hoja 1 para el control de Sigatoka negra en banano.

Tratamientos	Medias	Desviación Standard	
Sico + MSO Lecitech	160	44	A
Regnum + MSO Lecitech	73	29	B
Lonselor + MSO Lecitech	67	31	B
Volley + MSO Lecitech	71	33	B
Sico + Banole + Emulsificante	50	25	B
Regnum + Banole + Emulsificante	51	29	B
Lonselor + Banole + Emulsificante	65	34	B
Volley + Banole + Emulsificante	56	28	B
Control	202	31	A

ANOVA  $p < 0.05$ , p-value (AUC)  $p < 0.0001$



**Figura 5.** Varianza entre los tratamientos con emulsión de MSO y Banole en los valores de área bajo la curva (AUC) para la hoja 3 ( $p < 0.05$ ) en la semana 48.

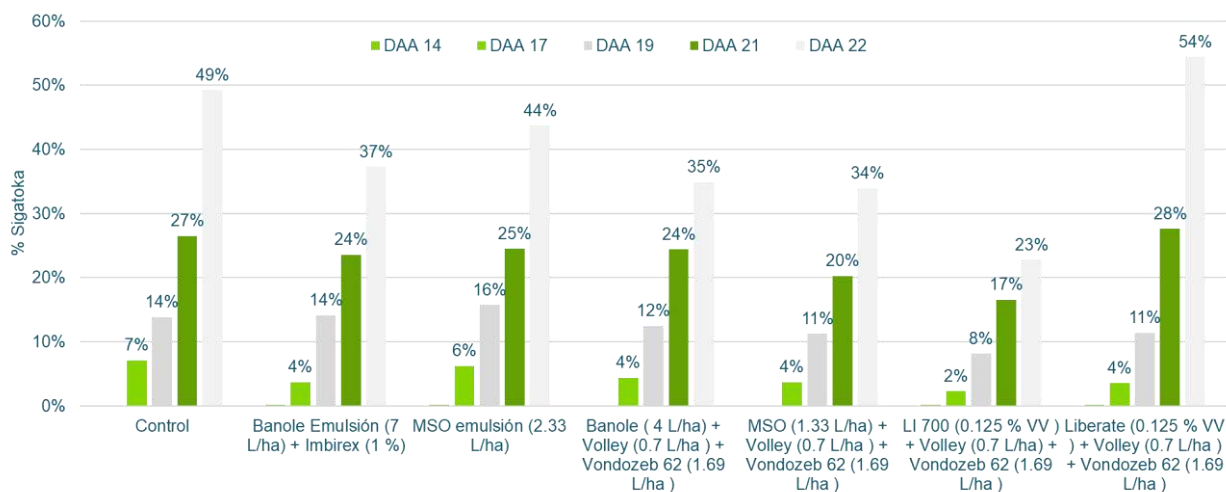
**Tabla 4.** Análisis estadístico mediante un modelo de varianza (ANOVA) de los diferentes tratamientos en la evaluación del MSO Lecitech vs aceite parafínico en combinación con fungicidas sistémicos en hoja 3 para el control de Sigatoka negra en banano.

Tratamientos	Medias	Desviación Standard	
Sico + MSO Lecitech	160	44	A
Regnum + MSO Lecitech	73	29	B
Lonselor + MSO Lecitech	67	31	B
Volley + MSO Lecitech	71	33	B
Sico + Banole + Emulsificante	50	25	B
Regnum + Banole + Emulsificante	51	29	B
Lonselor + Banole + Emulsificante	65	34	B
Volley + Banole + Emulsificante	56	28	B
Control	202	31	A

ANOVA  $p < 0.05$ , p-value (AUC)  $p < 0.0001$

### LI 700 Lecitech

De acuerdo a lo presentado en la Figura 6, se determinó que LI 700 presentó un nivel de control equivalente al obtenido con Banole en este ensayo, lo que indica que puede considerarse una alternativa viable al aceite parafínico.



**Figura 6.** Resultados de los diferentes tratamientos en el porcentaje de incidencia de Sigatoka negra en la hoja 1.

### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el ensayo indican que la tecnología LECITECH es una alternativa viable para sustituir el aceite parafínico en el control de Sigatoka negra. No se observaron diferencias significativas entre MSO LECITECH y aceite parafínico

en combinación con fungicidas sistémicos en la eficacia del control de la enfermedad. Además, el uso de MSO LECITECH presenta ventajas operativas, como la reducción en la dosis aplicada, la simplificación del manejo al emplear un solo producto en lugar de dos, y el aporte de propiedades adicionales derivadas de su composición a base de lecitina de soya y aceite metilado de soya, que confieren beneficios en anti-deriva, retención de gotas y penetración foliar.

Por otra parte, el LI 700, que comparte las características de LECITECH y añade un componente acidificante, se posiciona como una solución eficaz para programas de aplicación de protectantes, contribuyendo a mejorar la eficiencia y la cobertura del tratamiento.

## REFERENCIAS

Leci-Tech System - [https://www.youtube.com/watch?v=Th\\_2FD7a0tI](https://www.youtube.com/watch?v=Th_2FD7a0tI).

Single Leaf – a phrase used to describe by Dole to describe a method of Sigatoka assay. For protectant fungicide tests, it comprises of two applications made to the right, lower leaf lamina only - achieved by spraying the Candela leaf at growth stages 2 and 8.

FRAC- Fungicide Resistance Action Committee. Provides recommendations to the Banana industry on how to manage the development of fungicide resistance.

# Deriva de fitosanitarios en plantaciones de banano (*Musa AAA*) aplicados con un vehículo aéreo no tripulado con capacidad mayor a 20 litros

Edgar Valverde-Araya<sup>1\*</sup>, Wilmer Astorga<sup>1</sup>, Federico Ayuso<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dirección de Investigaciones, Eje de Fitoprotección, Corporación Bananera Nacional (CORBANA)

**\*Autor de correspondencia:**

Edgar Valverde-Araya  
evalverde@corbana.co.cr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

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

**Cita:**  
Valverde-Araya E, Astorga W,  
Ayuso F. 2026. Deriva de  
fitosanitarios en plantaciones  
de banano (*Musa AAA*)  
aplicados con un vehículo  
aéreo no tripulado con  
capacidad mayor a 20 litros.  
*Acorbat Revista de Tecnología  
y Ciencia* 3(1): 112  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26112>

## RESUMEN

El uso de drones en el cultivo de banano se ha constatado como una herramienta eficaz para la aplicación de productos fitosanitarios en áreas de difícil acceso y aspersión para las avionetas, sin embargo, la legislación actual en Costa Rica exige la misma zona de amortiguamiento para ambos equipos, para lo cual se hace necesario el estudio de la deriva y determinar si existen diferencias entre drones y avionetas. Se realizaron dos pruebas de deriva en finca San Pablo y en finca Jardín del Tigre con un dron con capacidad mayor a 20 litros. En cada prueba se realizó aspersión con el dron a 4 metros hacia adentro de la línea de borde del cultivo, ya que el equipo posee un ancho de banda de 8 metros. La aplicación se realizó a una altitud de 4 metros sobre el suelo, a una velocidad de 20 Km/h y a un volumen de 20 L/ha. Se colocaron 4 filas de colectores horizontales cada 5 metros hacia afuera de la línea de cultivo a 20 cm sobre el suelo y una línea de colectores verticales a 15 metros de la línea de cultivo a 1,9 metros sobre el suelo. No se identificó deriva a partir de los 5 metros de la línea de cultivo en finca San Pablo y a 6 metros en el caso de finca Jardín del Tigre. La utilización de drones con capacidad mayor a 20 litros es una opción viable para aplicar productos fitosanitarios en los bordes de las plantaciones de banano y permite un mayor aprovechamiento del área de cultivo en estas zonas.

**Palabras clave:** Deriva, Drones, Banano, Legislación

## ABSTRACT

The use of drones in banana cultivation has proven to be an effective tool for applying phytosanitary products in areas difficult to access and spray by airplanes; however, current legislation in Costa Rica requires the same buffer zone for both types of equipment, making it necessary to study drift and determine if there are differences between drones and airplanes. Two drift tests were conducted at the San Pablo farm and the Jardín del Tigre farm using a drone with a capacity greater than 20 liters. In each test, the drone sprayed 4 meters inward from the crop border, as the equipment has a bandwidth of 8 meters. Applications were carried out at an altitude of 4 meters above the ground, at a speed of 20 km/h, and at a volume of 20 L/ha. Four rows of horizontal collectors were placed every 5 meters outward from the crop line at 20 cm above the ground, and one line of vertical collectors was placed 15 meters from the crop line at 1,9 meters above the ground. No drift was identified beyond 5 meters of the crop line at the San Pablo farm and beyond 6 meters at the Jardín del Tigre farm. The use of drones with a capacity of greater than 20 liters is a viable option for applying phytosanitary products along the edges of banana plantations and allows for greater utilization of the crop area in these areas.

**Keywords:** Drift, Drones, Banana, Legislation



## INTRODUCCIÓN

La utilización de drones en la agricultura ha tomado una mayor importancia en la última década debido al constante avance tecnológico que ha aumentado los rendimientos de aplicación, debido al aumento en volumen de transporte y velocidad de aplicación (Pino, 2019; Iost *et al.*, 2019). Estas herramientas, permiten entre algunos beneficios, verificar la aplicación de fertilizantes y agentes de control, con mayor precisión y homogeneización de las aspersiones de sitio específico (González *et al.*, 2015; Carvalho *et al.*, 2020). En el cultivo de banano los drones se utilizan mayormente para las aplicaciones de fungicidas en los bordes u otros sitios de mayor dificultad en acceso a la plantación, de esta forma los polígonos de aplicación son más eficaces y el control de enfermedades como la Sigatoka negra, aumentan debido a una mejor cobertura y penetración del producto a aplicar dentro del dosel y retoños de sucesión.

Sánchez *et al.* (2021) evaluaron la eficacia del uso de drones para el combate de la Sigatoka negra, se estudiaron aspectos de volumen aplicado por hectárea, ancho de franja y boquillas a utilizar según el equipo para mejorar la cobertura y calidad de gota. Los resultados demostraron que el uso de drones con una capacidad menor a los 20 litros genera una deriva máxima de 5 metros. Sin embargo, en Costa Rica la legislación en aplicaciones aéreas regidas por el reglamento 44083 MAG-MOPT-SALUD-MINAE-MTSS (artículo 60) y la Comisión de Aviación Agrícola exige dar una misma zona de amortiguamiento a los drones con capacidad mayor a los 20 litros, igual que a las avionetas de fumigación.

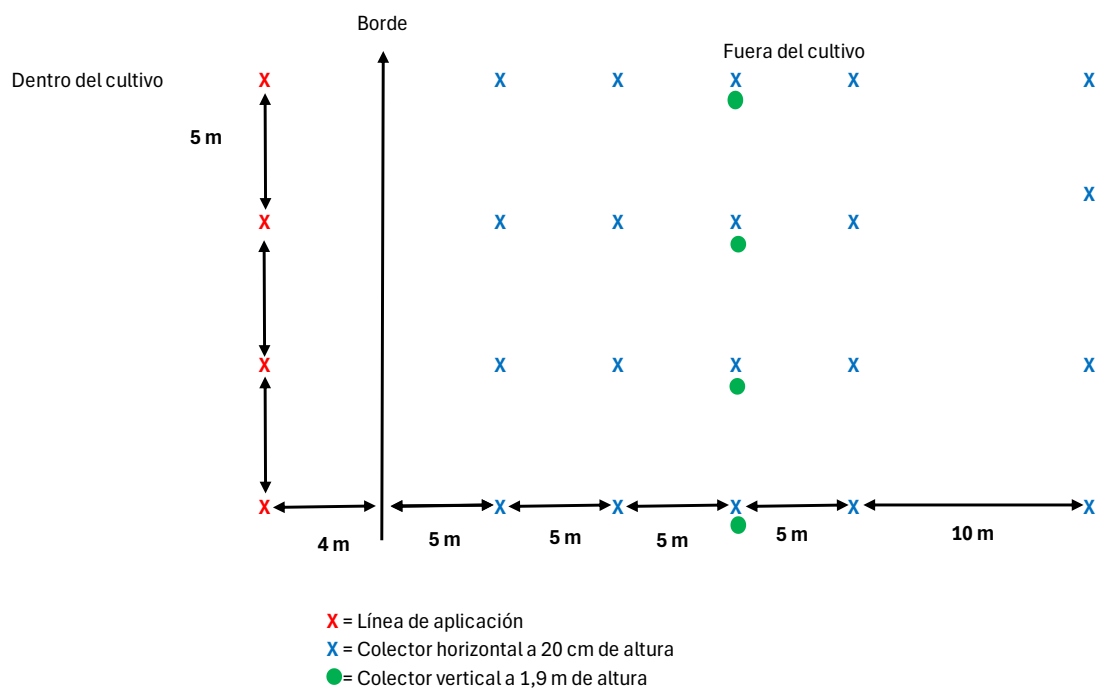
Dado que no hay información sobre el desplazamiento de la deriva de los agentes de control aplicados con estos equipos, es necesario generar información para ajustar y justificar el uso de los drones con capacidad mayor a 20 litros por parte de los productores de banano, además, debido al avance constante de la tecnología en este tipo de equipos la información generada debe servir como una guía para los futuros drones que no superen los 150 Kg de peso en vuelo como lo exige la legislación vigente.

El objetivo de esta investigación es definir la zona de amortiguamiento que deben existir en rondas de las fincas que son fumigadas con drones de capacidad mayor a 20 litros, de manera que se cumpla con las medidas de protección ambiental y que no genere un impacto en la producción del cultivo de banano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron dos pruebas, la primera el lunes 16 de diciembre de 2024 en finca San Pablo en Pacuarito, cantón de Siquirres y la segunda prueba el miércoles 09 de abril de 2025 en finca Jardín del Tigre en Cariari, cantón de Pococí. Se utilizó como

parcela de evaluación el borde o ronda de cultivo hacia la carretera, donde se realizó una medición de la deriva siguiendo los lineamientos establecidos para este tipo de pruebas según el protocolo ISO 22866 2005E "Methods for Field Measurement of Spray Drift" (ISO 22866 2005). Se utilizó un dron DJI Agras® T50, con un tanque de 40 L de capacidad y 2 boquillas centrífugas modelo LX8060SZ con capacidad de 50 a 500 micras. La mezcla utilizada en las fincas antes mencionadas fue la siguiente: Aceite agrícola (2 L/ha), emulsiificante (1 % volumen de aceite), mancozeb (2,0 L/ha) en un volumen total de 20 L/ha. El dron sobrevoló a una altitud de 4 m del suelo y 4 metros hacia adentro del borde de cultivo, con un ancho de franja de 8 m y una velocidad de 20 km/h. Para la medición de deriva, se colocaron 4 líneas de tarjetas colectoras hidrosensibles de 5,6 x 7,6 cm (TeeJet®) a 5 m de distancia entre cada línea, los colectores se colocaron horizontales a 20 cm del suelo a 5, 10, 15, 20 y 30 m del borde del cultivo (figura 1). En el caso de finca Jardín del Tigre, debido al canal secundario que se encontraba al borde del cultivo, la primera fila de colectores horizontales se colocó a 6 metros. Además, se colocaron colectores verticales a 1,9 m de altura a 15 m del borde del cultivo. Se aplicó con el dron un lote de 15 m de largo por 15 m de ancho (225 m<sup>2</sup>, una pasada del dron en sentido paralelo al borde del cultivo), sin presencia de ningún tipo de barrera vegetativa, iniciando del borde del cultivo hacia adentro. Se registraron las variables climáticas temperatura, % de humedad relativa, precipitación, velocidad del viento en direcciones norte-sur, este-oeste durante el periodo del experimento, en el caso de finca San Pablo la línea de cultivo va de sur a norte, para finca Jardín del Tigre la línea de cultivo es de oeste a este. Los colectores hidrosensibles recuperados del campo fueron analizados mediante el programa Deposit Scan® del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Deveau s.f), utilizado para este tipo de estudios (Cunha, 2013). Se escaneó cada colector y se obtuvo el número de gotas/cm<sup>2</sup>, volumen depositado en  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ , porcentaje de cobertura y diámetro volumétrico (DV1, DV5 y DV9) de la gota en  $\mu\text{m}$ .



**Figura 1.** Diseño del establecimiento de la prueba de deriva en campo.

## RESULTADOS

En el cuadro 1 se detallan las variables climáticas en las pruebas realizadas en cada finca, la velocidad del viento en finca San Pablo no afectó la prueba ya que la deriva se genera con ráfagas de viento perpendiculares a la línea de cultivo (en este caso de este a oeste), además, Fernández-Quintanilla (2013) y Matthews *et al.* (2014) indican que la máxima velocidad de viento recomendada para aspersiones aéreas es de 10 Km/h o el equivalente a 2,7 m/s.

**Cuadro 1.** Variables climáticas en el período de evaluación de deriva en fincas San Pablo y Jardín del Tigre.

Finca	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Precipitación (mm)	Velocidad del viento norte-sur (m/s)	Velocidad del viento este-oeste (m/s)
San Pablo	24,02	82,3	0	2,7*	0
Jardín del Tigre	22,96	86,3	0	0	0

\*Velocidad del viento en dirección norte-sur, fue paralela a la línea de aspersión.

Para las dos pruebas realizadas en las distintas fincas no se registraron datos de gotas/cm<sup>2</sup>, volumen depositado en  $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ , porcentaje de cobertura y diámetro volumétrico a partir de la primera línea de tarjetas hidrosensibles (5 metros) en finca San Pablo y a partir de los 6 metros del borde del cultivo en finca Jardín del Tigre (Anexos 1 y 2).

Estos resultados son de relevancia para la producción de banano, ya que no se requiere aumentar el tamaño de la zona de amortiguamiento utilizada actualmente y basada en el estudio realizado con drones con un volumen menor a los 20 litros (Sánchez *et al.*, 2021).

Las condiciones de aplicación son fundamentales para poder disminuir la deriva, en este caso el viento que impacta de manera perpendicular a la línea de aplicación, ya que puede transportar las moléculas suspendidas en el aire y desplazarlas fuera de la línea limítrofe de la zona de amortiguamiento (Arvidsson *et al.*, 2011). La revisión constante de las variables climáticas en horas de aplicación surge como una herramienta valiosa para cumplir con las normas técnicas de protección ambiental.

Es importante observar que la altura y velocidad de vuelo son diferentes a lo que se utiliza comercialmente en aplicaciones con drones en el cultivo de banano (3 metros sobre el dosel del cultivo y 35 Km/h), a mayor altura de aplicación las moléculas suspendidas en el aire se pueden desplazar de forma horizontal por la turbulencia causada por los motores de la aeronave, así mismo, una velocidad mayor a los 20 Km/h causa un mayor arrastre del producto aplicado hacia afuera de la línea de aplicación.

Los pilotos de drones con capacidad mayor a los 20 litros utilizados para la aplicación de productos fitosanitarios en el cultivo de banano deben aislar la línea de borde de los polígonos convencionales de fumigación, estableciendo las variables discutidas en esta investigación y verificando las variables climáticas que puedan

favorecer la deriva, con esto se logran cumplir los lineamientos de zonas de amortiguamiento que garanticen la protección al ambiente y se evita disminuir el área de producción en los bordes de las fincas (Valenciano *et al.*, 2007).

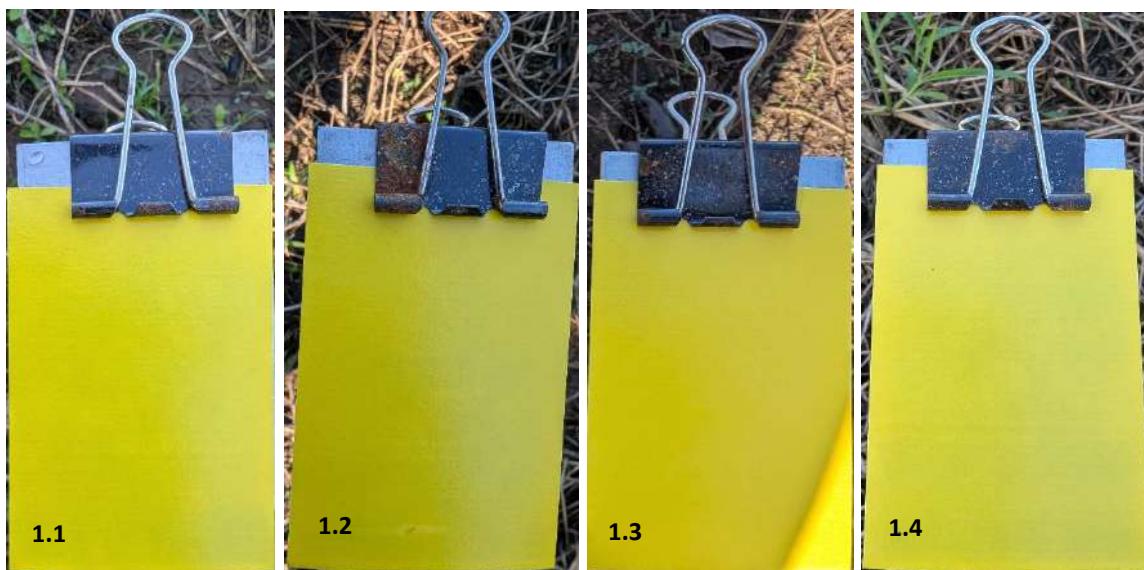
## CONCLUSIONES

De acuerdo con las variables analizadas en esta investigación, los drones con una capacidad mayor a los 20 litros requieren una zona de amortiguamiento máxima de 6 metros a partir de la línea de cultivo. De esta forma se cumple con la directriz técnica nacional que busca la protección ambiental en las áreas que bordean las fincas bananeras y a su vez, no se requieren disminuir las áreas de producción.

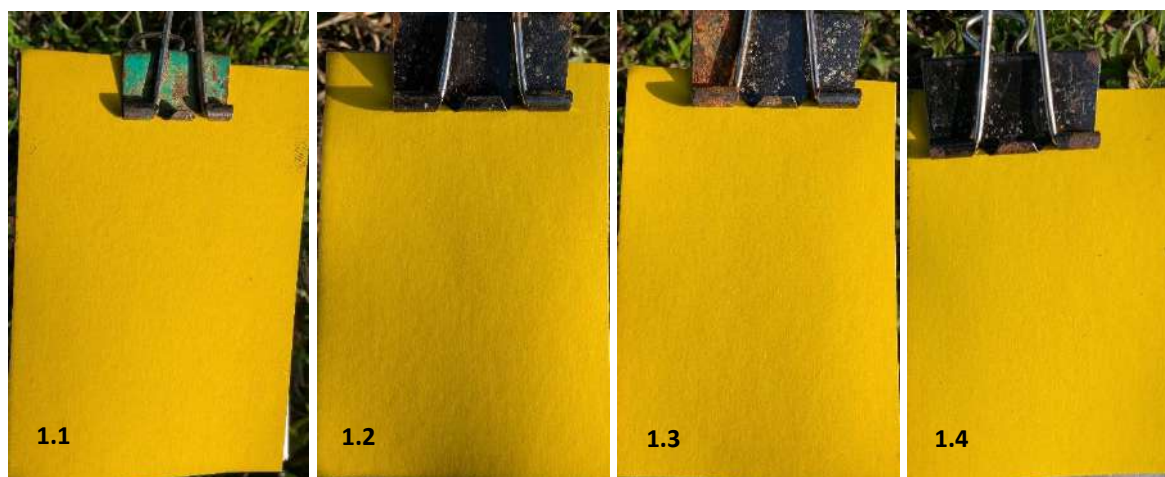
## REFERENCIAS

- Arvidsson T, Bergström L, Kreuger J. 2011. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. *Pest Management Sci.* 67: 586–598 p.
- Carvalho F, Chechetto R, Mota A, Antuniassi U. 2020. Challenges of aircraft and drone spray applications. *Outlooks on Pest Management.* 1-6 p.
- Cunha J, Farnese A y Olivet J. 2013. Computer programs for analysis of droplets sprayed on water sensitive papers. *Planta Daninha, Viçosa-MG.* 31(3): 715-720.
- Deveau J. s. f. Using DepositScan with either a business card scanner or an office flatbed scanner. 4 p.
- Fernández-Quintanilla C, Dorado J. 2013. Tecnología de aplicación de productos fitosanitarios. En *Protección Vegetal.* Ediciones Muni-Prensa. 87-110 p.
- González A, Amarillo G, Amarillo M, Sarmiento F. 2015. Drones aplicados a la agricultura de precisión. *UNAD.* 10(1): 23- 37 p.
- Iost F, Heldens W, Kong Z, de Lange E. 2019. Drones: Innovative Technology for Use in Precision Pest Management. *Journal of Economic Entomology,* 20(20): 1–25 p.
- ISO22866:2005. 2005. Equipment for crop protection-Methods for field measurement of spray drift.
- Matthews G, Bateman R, Miller P. 2014. *Pesticide application methods.* Third edition. Ed. John Wiley & Sons, Ltd. 91 p.
- Pino E. 2019. Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. *IDESIA.* 37(1): 75-84 p.
- Sánchez M, Villalobos R, Villalta R, Carr C, Guzmán M. 2021. Medición de la deriva en aplicaciones aéreas de fungicidas para el combate de la Sigatoka Negra con sistema de aeronaves no tripuladas (RPAS-DRON) en el cultivo de banano. Hoja divulgativa N° 21. Corporación Bananera Nacional S.A. (CORBANA).
- Valenciano R, Laprade S, Founier A, Trejos E. 2007. Manejo de la deriva en aplicaciones aéreas de plaguicidas en fincas con zonas de amortiguamiento. CORBANA S.A. 1 ed: 10 p.

**Anexos**



**Anexo 1.** Colectores de la primera fila a 5 metros de la línea de cultivo postaplicación en finca San Pablo.



**Anexo 2.** Colectores de la primera fila a 6 metros de la línea de cultivo postaplicación en finca Jardín del Tigre.

## Acciones que implementa el Gobierno de México para prevenir el ingreso de la Marchitez por *Fusarium- Foc R4T*

Francisco Ramírez y Ramírez<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). Insurgentes Sur No. 489, Piso-7, CP. 06100. Colonia Hipódromo, Alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México.

\*Autor de correspondencia:  
Francisco Ramírez y Ramírez  
gestion.dgsv@senasica.gob.mx

**Contribución:**  
Nota de Investigación

**Sección:**  
Fitosanidad

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

**Cita:**  
Ramírez y Ramírez F. 2026.  
Acciones que implementa el  
Gobierno de México para  
prevenir el ingreso de la  
Marchitez por *Fusarium- Foc*  
*R4T*. *Acorbat Revista de*  
*Tecnología y Ciencia* 3(1): 113  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26113>

### RESUMEN

La Marchitez de las musáceas por *Fusarium* (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical-Foc R4T), es una plaga ausente en México. Por lo anterior, como parte de la gestión de riesgo, el SENASICA elaboró el Análisis de Riesgo de Plagas, por medio del cual se determinó que Foc R4T es una plaga de Riesgo Medio, se identificaron las posibles vías de introducción y se establecieron las medidas fitosanitarias para mitigar el riesgo. En los puntos de ingreso al país se realizan actividades de inspección dirigidas a productos y subproductos de musáceas para su intercepción, retención y destrucción; incluyendo la inspección a turistas de manera directa y no intrusiva. Desde el 2011, se realizan muestreos para la detección oportuna de plantas sospechosas a Foc R4T, a partir de 2022 se priorizan mediante tecnología de modelos biogeostadístico-climático y en 2025 a través de Sensores remotos (Dron e Imagen de Satélite), las muestras son analizadas mediante un protocolo de diagnóstico robusto y armonizado a nivel internacional. Además, se realizan actividades de vinculación para comunicar el riesgo que representa la plaga y eventos de capacitación en el reconocimiento de síntomas sospechosos. Adicionalmente, el SENASICA coordina un proyecto para la generación de variedades resistentes y manejo integrado de la plaga mediante el aislamiento y evaluación de organismos antagonistas. Las 1,726 muestras sospechosas a Foc R4T han resultado negativas.

**Palabras clave:** Prevención, Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria, Detección oportuna, Marchitez de las musáceas por *Fusarium*, Innovación tecnológica

### ABSTRACT

*Fusarium* wilt of Musaceae (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 -Foc TR4), is a pest absent in Mexico. Because of this, as part of risk management, SENASICA prepared the Pest Risk Analysis, through which it was determined that Foc TR4 is a Medium Risk pest, possible routes of introduction were identified and phytosanitary measures were established to mitigate the risk. At points of entry into the country, inspection activities are carried out for the interception, retention and destruction of musaceae products and by-products, including direct and non-intrusive inspection of tourists. Since 2011, sampling has been carried out for the timely detection of Foc TR4-suspect plants. From 2022 onwards, priority will be given to biogeostatistical-climatic modeling technology, and in 2025 to remote sensing (drone and satellite imagery). The samples are analyzed using a robust, internationally harmonized diagnostic protocol. In addition, outreach activities are carried out to communicate the risk posed by the pest and training events in the recognition of symptoms. Additionally, SENASICA coordinates a project for the generation of resistant varieties and integrated pest management through the isolation and evaluation of antagonistic organisms. All 1,726 samples suspected of Foc TR4 have tested negative.

**Keywords:** Prevention, Phytosanitary epidemiological surveillance, Early detection, *Fusarium* wilt of Musaceae, Technological innovation



## INTRODUCCIÓN

### **Análisis de Riesgo de Plagas (ARP)**

En 2019, el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), elaboró el estudio de ARP para Foc R4T, donde se determinó que su condición en México es Ausente: la plaga no se ha registrado; por lo que, cumple con la definición de plaga cuarentenaria. Se analizaron las vías de introducción consistentes en material vegetal propagativo, maquinaria agrícola usada, movilización por suelo adherido a zapatos de migrantes y científicos, artesanías y agua de lastre; se realizó la evaluación de riesgo, determinándose que es una plaga de Riesgo Medio para nuestro país; además, se determinaron las medidas de manejo más apropiadas para mitigar el riesgo, como, colocación de tapetes fitosanitarios en los puntos de ingreso al país, retención y destrucción de artesanías elaboradas con fibras de musáceas, y recomendar a las embarcaciones navieras que descarguen el agua de lastre a por lo menos 50 millas náuticas de litorales de México.

### **Inspección fitosanitaria en puntos de ingreso al país**

En los puntos de ingreso al país (puertos, aeropuertos y fronteras), se realizan las siguientes acciones: a) inspección de productos y subproductos de musáceas, b) retención y destrucción de las mismas, c) revisión de embarcaciones marítimas y sellado de gambuzas, y d) monitoreo de mercancías en tránsito internacional, con la finalidad de interceptar productos y subproductos de musáceas. Además, se inspeccionaron embarcaciones turísticas, en donde se realizaron actividades para retener y destruir comisariatos y sellar las gambuzas y uso de tapetes fitosanitarios.

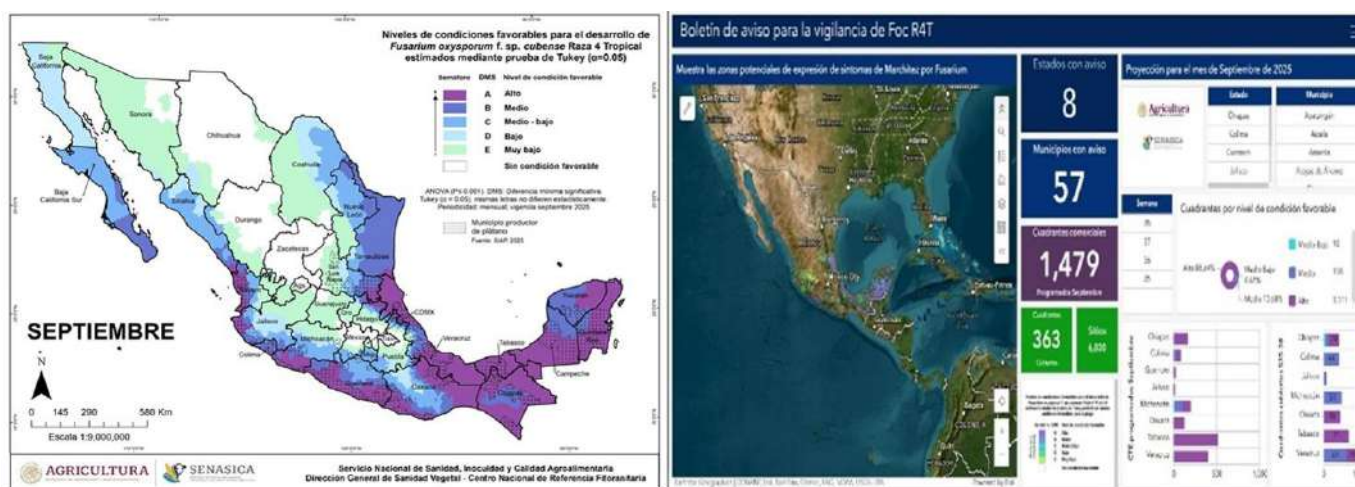
En ese sentido, durante el periodo 2018-2025, el SENASICA también llevó a cabo la inspección a turistas para detectar, retener y destruir productos y subproductos de musáceas mediante, al respecto se emitieron un total de 145,933 avisos preventivos sanitarios: inspección directa de equipaje (69,413), binomios caninos (62,372), Agencia Nacional de Aduanas de México (7,263), rayos X (3,804), Declarado (2,892), Guardia Nacional (188) y No especificado (1).

### **Vigilancia de la Marchitez de las musáceas por *Fusarium* en México**

Desde el año 2011, se realizan acciones para la Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria de la marchitez de las musáceas por *Fusarium*, adicionalmente a partir del año 2019 a través de la Campaña contra Moko del plátano se coadyuva en la vigilancia de la plaga, de tal manera que durante el periodo de 2011-2025 se realizaron 540,350 encuestas y se inspeccionaron 23,125,848 plantas, se colectaron 1,726 plantas con síntomas sospechosos, que resultaron con diagnostico negativo a Foc R4T.

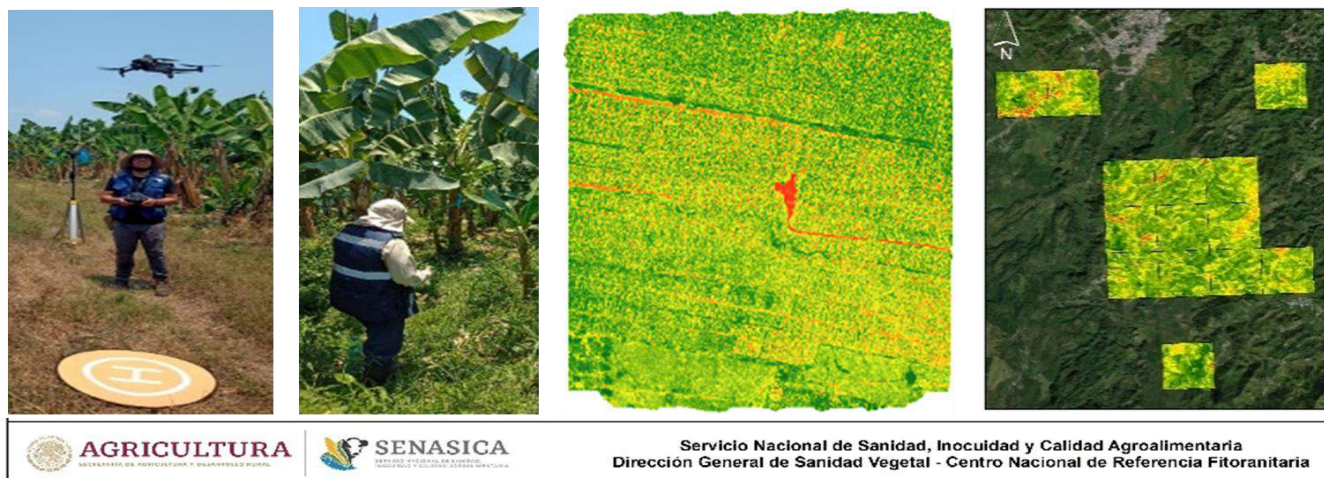
Para realizar dicha actividad, en 2023, México registró una plantilla de 85 técnicos que realizan acciones de vigilancia en el cultivo del plátano, en 17 estados de la República Mexicana; además de 17 técnicos de la Campaña de Moko de plátano.

Con la finalidad de optimizar la vigilancia de la plaga basado en una lógica dinámica y flexible en espacio y tiempo, desde septiembre de 2022, se elaboran boletines mensuales para los principales y en 2025 se emiten de forma digital para los 16 estados productores (8 en zona comercial), en donde se determinan 6 niveles de condiciones para el desarrollo y expresión de síntomas de la plaga, siendo estos: Alto, Medio, Medio Bajo, Bajo, Muy bajo y Sin condición (Figura 1), lo que permite optimizar el recurso humano y financiero para su detección oportuna.



**Figura 1.** Estimación de condiciones favorables potenciales para la expresión de síntomas de Foc R4T en México para el mes de septiembre de 2025, por medio del modelo dinámico.

A partir de febrero de 2025, se implementó como innovación fitosanitaria el uso de Drones (DJI M3M) e Imágenes de Satélite (Sentinel 2) para la Vigilancia de la Marchitez de las musáceas por *Fusarium* para la identificación de anomalías (plantas con síntomas de amarillamiento o senescencia ocasionada por diversos factores: patógenos, estrés hídrico, deficiencia nutricional o por factores abióticos) en el cultivo del plátano. Se realizó una cobertura de 9,047 hectáreas, con un barrido multispectral de 12.6 millones de plantas, en 11 municipios de 5 principales estados productores (Tabasco, Chiapas, Veracruz, Colima y Michoacán). Esto permitió el aumento de la cobertura diaria de la Vigilancia de 25 hectáreas a un 800 % con Dron (200 hectáreas) y un 9,600 % (2,400 hectáreas) con Imagen de Satélite, la optimización de recursos asignados y la toma de muestra dirigida a través de índices multispectrales.



**Figura 2.** Identificación de anomalías en el cultivo del plátano en México mediante barridos multispectrales con Dron DJI M3M e Imágenes de Satélite Sentinel 2 para el mes de abril y julio de 2025.

### Diagnóstico Fitosanitario para Foc R4T México

En 2018, el SENASICA elaboró la primera versión del Protocolo de Diagnóstico Fitosanitario para Foc R4T armonizado con la Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias NIMF 27 (CIPF, 2016), previo a esa fecha se realizaba el diagnóstico por morfometría y PCR usando los iniciadores reportados por Dita *et al.* (2010); a la fecha se han realizado dos actualizaciones del protocolo, una en 2022 y otra en 2023. Actualmente se cuenta con la Versión 3 de dicho documento, el cual está armonizado con la Comunidad Andina. El protocolo de diagnóstico desarrollado en México contempla lo siguiente: a) Diagnóstico por morfo-taxonomía, b) PCR punto final (varios iniciadores), c) Amplificación isotérmica LAMP, d) PCR tiempo real con sonda TaqMan, e) Ensayo PCR + RFLP, f) Secuenciación de fragmentos cortos (Tipo Sanger) y genoma completo (Next Generation Sequencing) y g) Análisis filogenético con herramientas de bioinformática (SENASICA, 2023).

En 2018, 2022 y 2023, el protocolo de diagnóstico se transfirió a los laboratorios aprobados por el SENASICA, con la finalidad de incrementar la capacidad de diagnóstico a nivel nacional. Así mismo, en octubre de 2022, se transfirió el protocolo desarrollado por SENASICA a 11 países de Centro y Sudamérica. Además, en 2025, la FAO tomó como referencia el protocolo de diagnóstico de México para emitir directrices tendientes a la prevención, preparación y respuesta frente a Foc R4T.

**Plan de acción para la aplicación de medidas fitosanitarias contra la marchitez de las musáceas por *Fusarium*, plaga ausente de México**

Desde el 2015, el SENASICA cuenta con un Plan de Acción para activar las medidas fitosanitarias tendientes a la contención de la plaga ante una eventual detección, para lo cual, se tomó como insumo el Plan de Acción del OIRSA (Dita *et al.*, 2013), el cual fue adaptado considerando la biología de la plaga, específicamente la dispersión por arrastre de partículas de suelo contaminadas y propágulos a través de las escorrentías y salpique de agua de lluvia, además de animales y herramientas de trabajo contaminadas. El Plan de Acción actualizado incluye las actividades de: 1) delimitación, 2) exploración o muestreo, 3) cuarentena, 4) exclusión, 5) medidas de bioseguridad y 6) manejo / supresión de la plaga.

### **Vinculación y capacitación**

Durante el año 2023, el SENASICA y el Comité Sistema Producto Plátano Nacional A.C. realizaron siete eventos de vinculación y capacitación dirigidas a productores, industria y técnicos vinculados con el cultivo de plátano en Tabasco, Colima, Chiapas, Veracruz, Nayarit y Jalisco, con la finalidad de dar a conocer las acciones que realiza el SENASICA para la prevención de la marchitez por *Fusarium*, así como capacitación sobre el reconocimiento de síntomas y signos de las plagas prioritarias del cultivo de plátano. Participaron 579 personas, entre productores, técnicos, investigadores de universidades y centros de investigación, estudiantes, funcionarios de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural y de los estados y municipios. Además, se impartieron 10 capacitaciones presenciales en las instalaciones del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria, dirigidas a técnicos del Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria de los 32 estados.

En 2021 se realizaron capacitaciones virtuales sobre el reconocimiento de síntomas y daños causados por la marchitez de las musáceas por *Fusarium*, dirigidas a técnicos de campo de los Comités Estatales de Sanidad Vegetal, productores y personal de la Dirección General de Sanidad Vegetal. Participaron 289 técnicos operativos de los estados de Chiapas, Puebla, Michoacán, Tabasco, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, San Luis potosí, Nayarit, Jalisco, Quintana Roo y Colima. En 2023, a través de la plataforma educativa del Programa de Vigilancia (VEFEDUC), se impartieron dos módulos sobre el reconocimiento de síntomas sospechosos a marchitez por *Fusarium*, cogollo racimoso del banano, marchitez bacteriana y moko del plátano, a un total de 329 asistentes.

En 2024 se realizó el taller de capacitación para la toma y envío de muestras con síntomas sospechosos a Foc R4T y el simulacro de medidas de bioseguridad con 233 participantes y en 2025 se impartió el curso principales plagas en el cultivo de plátano con 217 participantes

De 2020 a 2025 se ha participado en cursos, congresos, simulacros y eventos de capacitación internacional realizados en Panamá, Guatemala, Colombia, Nicaragua, Brasil, Austria, China, para potencializar la capacidad de respuesta ante una eventual introducción de Foc R4T.

### **Simulacros de accionabilidad ante una detección eventual de Foc R4T**

De 2015 a la fecha se han realizado ocho simulacros de accionabilidad, siete de forma presencial y uno virtual, con los objetivos de 1) Evaluar la operatividad del Plan de acción ante un brote de Foc R4T elaborado por México, 2) Capacitar al personal técnico y 3) Actualizar el Plan de acción.

### **Investigación**

**Colecta, aislamiento y evaluación de organismos antagonistas.** En el año 2022, el SENASICA inició un proyecto con el objetivo de desarrollar una tecnología sustentable a futuro para el manejo de Foc R4T basado en la salud del suelo, el cual contempla: i) aislamiento de organismos antagonistas de muestras de suelo en sitios donde se cultiva plátano en los estados de Colima, Tabasco, Chiapas, Michoacán, Veracruz y Nayarit, ii) ensayos de bioprotección con los aislamientos de mayor capacidad antagonista en vitroplantas susceptibles a Foc Raza 1 y Raza 2, en condiciones de invernadero y iii) evaluación en campo. Como resultado se han obtenido las cepas *Trichoderma asperellum* CHE-CNRCB 1245 y *T. afroharzianum* CHE-CNRCB 1259 con antagonismo de 65 % y 68.81 %, respectivamente.

**Generación de variedades tolerantes.** En el marco del Proyecto Interregional “Fortalecimiento de las capacidades de los Estados Miembros para combatir la marchitez del banano (TR4)”, el SENASICA en colaboración con el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, están desarrollando un proyecto para la generación de variedades resistentes / tolerantes a la marchitez de las musáceas por *Fusarium*. El proyecto tiene una duración de 5 años (2022-2026), los avances contemplan el desarrollo y actualización del protocolo de investigación, identificación de genotipos a irradiar y estudios de radiosensibilidad *in vitro* de meristemos de plátano oaxaqueño y plátano macho cv Schifle.

### **Retos a corto y mediano plazo**

Los retos a corto y mediano plazo son: 1) Desarrollar nuevas tecnologías para la detección temprana de la enfermedad, 2) Obtener de una variedad tolerante a Foc R4T, 3) Generar un esquema de manejo integrado para “convivir” con dicha plaga, 4) Mayor concientización de los productores sobre la amenaza de las plagas del banano.

### Consideraciones finales

Como resultado de las acciones de exclusión y prevención se ha evitado la introducción de Foc R4T, protegiendo las 87,393 hectáreas establecidas con cultivo de plátano, que producen 2,670,290 toneladas, con un valor de la producción de 11,722,149,890 pesos (SIAP, 2024).

Se ha protegido la fuente de ingresos que representa el cultivo del plátano para los productores y trabajadores del sector, que genera 100,000 empleos directos y 164,000 empleos indirectos (CSPPN, 2023).

México cuenta con personal técnico capacitado del Comité Sistema Producto Plátano Nacional A.C., Organismos Auxiliares de Sanidad Vegetal y del SENASICA, así como, con medidas preventivas basadas en riesgo asociadas a las vías de introducción de Foc R4T y con un Plan de Acción para implementarse ante un brote de la plaga, de ser el caso.

### Agradecimientos

Al Comité Sistema Producto Plátano Nacional A.C., y a todas aquellas instituciones y personas que realiza actividades tendientes a la prevención de la plaga.

### REFERENCIAS

- CIPF. 2016. Protocolos de diagnóstico para las plagas reglamentadas. Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias 27. Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF). <https://www.fao.org/3/cb2615es/cb2615es.pdf>. Consulta el 6 de febrero de 2026.
- CSPPN. 2023. Ficha informativa del cultivo de plátano en México. Comité Sistema Producto Plátano Nacional A.C. 2 p.
- Dita MA, Waalwijkb C, Buddenhangenc IW, Souza MT, Kema GHJ. 2010. A molecular diagnostic for Tropical Race 4 of the banana *Fusarium* wilt pathogen. *Plant Pathology*, 59: 348-357. <https://bsppjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-3059.2009.02221.x>. Consulta el 6 de febrero de 2026.
- Dita RMA, Echegoyén RPE, Pérez VLF. 2013. Plan de contingencia ante un brote de la Raza 4 Tropical de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* en un país de la región del OIRSA. Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA). San Salvador, El Salvador. 155p.
- SENASICA. 2018. Protocolo de diagnóstico *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical (Marchitez por *Fusarium*). Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). 28p. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/812367/Prot\\_Fusarium\\_oxysporum\\_f.sp.cubense\\_Raza\\_4\\_Tropical\\_compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/812367/Prot_Fusarium_oxysporum_f.sp.cubense_Raza_4_Tropical_compressed.pdf). Consulta el 06 de febrero de 2026.
- SIAP. 2024. Anuario Estadístico de la producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). <http://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Consulta el 06 de febrero de 2026.

## Coexistiendo con Fusarium R4T, Moko y el virus del Bunchy Top: 20 años del caso Filipino

Hugo Carrillo Montero\*  
Investigador independiente, Costa Rica

\*Autor de correspondencia:  
Hugo Carrillo Montero  
hcarrillo19@gmail.com

**Contribución:**  
Nota de Investigación

**Sección:**  
Fitosanidad

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

**Cita:**  
Carrillo Montero H. 2026.  
Coexistiendo con Fusarium  
R4T, Moko y el virus del  
Bunchy Top: 20 años del caso  
Filipino. *Acorbat Revista de  
Tecnología y Ciencia* 3(1): 114  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26114>

### RESUMEN

La industria global del banano, valorada en más de 20 mil millones de dólares anuales, tiene en Latinoamérica su principal motor, con el 79 % de la producción mundial, seguida por Asia con el 17 %, región en la que Filipinas lidera con cerca del 10 %. Sin embargo, Filipinas enfrenta un declive sistémico en su área de producción y su volumen. Entre 2012 y 2024, la superficie cultivada se redujo un 36 % y la producción total cayó un 44 %. Este colapso, frecuentemente atribuido de forma exclusiva al avance del Fusarium TR4, obedece a una confluencia de factores: Moko, Bunchy Top, Sigatoka, bioseguridad deficiente, fracaso del modelo de tierras altas, manejo técnico limitado y presiones externas. El somaclón GCTCV-218 fracasó en uso comercial por bajo rendimiento y alta susceptibilidad a trastornos fisiológicos. Aunque existen nuevas selecciones mejoradas, estas son de uso privado. La edición genética CRISPR-Cas9 surge como alternativa futura. La sostenibilidad depende de un paquete técnico robusto, bioseguridad eficaz y gestión disciplinada, como lo demuestran productores que mantienen altos rendimientos pese a los mismos retos.

**Palabras clave:** Filipinas, Mal de Panamá (TR4), GCTCV 218, Bioseguridad, Paquete técnico

### ABSTRACT

The global banana industry, valued at over 20 billion dollars annually, finds its main engine in Latin America (79% of world production), followed by Asia (17%), where the Philippines contributes around 10%. However, the Philippines is undergoing a systemic decline in production area and volume. Between 2012 and 2024, cultivated areas decreased by 36% and production by 44%. This collapse, often attributed solely to Fusarium TR4, results from multiple factors: Moko, Bunchy Top, Sigatoka, weak biosecurity, failure of the highland production model, poor technical management, and external pressures. The GCTCV-218 somaclonal variant failed commercially due to low yield and high susceptibility to physiological disorders. New improved selections exist but remain private. CRISPR-Cas9 gene editing offers future potential. Sustainability relies on a robust technical package, effective biosecurity, and disciplined management, as demonstrated by producers maintaining high yields despite the same challenges.

**Keywords:** Filipinas, Panama disease (TR4), GCTCV 218, Biosecurity, Technical guide



## Situación Actual de la Industria Bananera

La industria global del banano produce aproximadamente mil millones de cajas de 18.14 kg al año, con un valor de mercado cercano a \$20 mil millones de dólares. Latinoamérica domina las exportaciones mundiales con el 79% del volumen, con Ecuador (33 %), Guatemala (12 %), Costa Rica (12 %) y Colombia (9 %) como principales exportadores de la región. Asia es la segunda región exportadora, aportando el 17 % del volumen global. Dentro de Asia, Filipinas es un actor clave, con una producción de exportación concentrada en la isla de Mindanao. En 2024, Filipinas exportó cerca de 85 millones de cajas de 18.14 kg, lo que representa el 9 % del volumen mundial. Sus principales mercados de exportación son Japón (45 %), China (25 %), Corea (15 %) y Medio Oriente (12 %). Los principales exportadores en Filipinas son Dole (23 %), Sumifru (20 %) y Del Monte (13 %). Sin embargo, la industria bananera de Filipinas se encuentra en un punto crítico, enfrentando una convergencia de desafíos que amenazan su posición histórica como líder de la exportación de banano en Asia y Medio Oriente. El área productiva ha disminuido de más de 75,000 hectáreas en 2012 a menos de 50,000 en 2024, lo que representa una reducción del 36 %. De forma similar, el volumen de producción cayó de 151 millones de cajas en 2012 a 85 millones de cajas en 2024, una reducción del 44 %. Estos datos evidencian no solo una disminución en el área de cultivo, sino también una caída general en la productividad, lo que implica un aumento de costos. Si bien la causa principal de este deterioro a menudo se atribuye exclusivamente al avance del Mal de Panamá (TR4), un análisis detallado revela una realidad mucho más compleja donde la situación actual es una crisis multifacética donde factores geopolíticos, un contexto técnico desafiante, regulaciones locales y retos climáticos se combinan con una amenaza fitosanitaria múltiple en rápida expansión. El pobre control de enfermedades como *Fusarium oxysporum* (Mal de Panamá), Bunchy Top y Moko, junto con el desafío constante de controlar la Sigatoka Negra, han creado una "tormenta perfecta" que ha provocado un declive en la producción, aumento constante de los costos y la consecuente pérdida de competitividad. Aunque Filipinas ha mantenido su estatus como principal exportador de banano en Asia, la dinámica del mercado ha comenzado a cambiar. Un ejemplo tangible de esto se vio en los primeros siete meses de 2024, cuando Filipinas experimentó una caída en sus exportaciones a China, cediendo espacio de mercado a Vietnam por primera vez en décadas. Esto subraya una pérdida de competitividad sin precedentes para Filipinas (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Evolución del área plantada y volumen anual. Filipinas.

Año	Ha '000	Cajas '000,000	Var	Comentarios
2012	75	151		Tifón
2013	63	126	▼	Tifón
2014	69	139	▲	
2015	69	139	■	
2016	61	123	▼	Sequía
2017	69	141	▲	
2018	74	150	▲	
2019	70	142	▼	Sequía
2020	57	115	▼	Pandemia
2021	58	117	▲	
2022	54	95	▼	Guerra
2023	53	98	▲	
2024	48	85	▼	Sequia

Cajas de 18.14 Kg año calendario

### Factores Multicausales del Declive Filipino

Aunque el hongo *Fusarium* ha estado presente desde 2005, el punto de inflexión ocurrió en diciembre de 2012 con el Tifón Pablo. Este tifón de categoría 5 arrasó plantaciones y, lo más importante, se convirtió en un vehículo para la diseminación del hongo por prácticamente todas las tierras de cultivo de la isla. De 2013 a 2015, se hicieron esfuerzos significativos para recuperar las áreas de cultivo, logrando un aumento en la superficie y la producción. Sin embargo, en 2016, el fenómeno de El Niño provocó una sequía prolongada que diezmó la producción en las áreas con pobres condiciones técnicas y sin posibilidades de riego, reduciendo el volumen a 123 millones de cajas. Entre 2017 y 2019, la industria experimentó una notable recuperación, alcanzando 74,000 hectáreas cultivadas y 150 millones de cajas. Este resurgimiento fue impulsado por la expansión hacia las tierras altas y la adopción de nuevas variedades tolerantes. Sin embargo, a partir de 2018, la producción volvió a caer. A pesar de su tolerancia a TR4, las nuevas variedades demostraron tener una menor productividad debido a ciclos de producción más lentos, alta susceptibilidad a trastornos fisiológicos como la mancha de madurez, alto desperdicio y bajo peso de racimo. Una nueva sequía en 2020 afectó las áreas sin riego, incluso en las tierras altas, alargando aún más los ciclos de producción y aumentando el desperdicio por mancha

de madurez. La pandemia de COVID-19 limitó la supervisión técnica, y las disrupciones marítimas y la guerra en Ucrania aumentaron los costos de los insumos, obligando a los productores a priorizar decisiones financieras sobre las mejores prácticas técnicas. Un nuevo fenómeno de El Niño en 2023 aceleró la reducción de la superficie cultivada y el volumen de producción, llevando a un mínimo histórico en 2024, con solo 85 millones de cajas de 18.14 Kg de producción.

### **Modelo de Producción (Tierras Altas)**

La expansión hacia las tierras altas se promovió como una estrategia clave para la recuperación y como un área de refugio contra el TR4. La expectativa inicial era que la incidencia del TR4 sería prácticamente nula, y permitiría producir una fruta con características organolépticas superiores con necesidad de riego e incidencia de Sigatoka mínimas. Se clasificaron tres regiones según su elevación: Tierras Bajas (0-300 m s. n. m), Tierras Medias (300-500 m s. n. m) y Tierras Altas (500-1,000 m s. n. m). Sin embargo, esta estrategia trajo consigo desventajas significativas no previstas. Las diferencias climáticas afectaron negativamente el rendimiento causado por la reducción del retorno de 1.40 a 1.0 o menos en las tierras más altas, y el alargamiento de las semanas a cosecha llegando hasta a 17 semanas. Además, el esfuerzo por consolidar nuevas áreas resultó en la selección de terrenos con condiciones deficientes, incluyendo suelos pobres (muy bajo pH (3.0), alto contenido de arcilla (+60 %) o arena (+50 %), alta compactación, sin riego con precipitaciones de 1800 mm/Y o menos) junto con pendientes pronunciadas (+10 %) sin un adecuado manejo de las aguas de escorrentía y erosión. La fragmentación de las fincas, causada por la difícil topografía y las limitaciones de la reforma agraria, afectó seriamente la gestión operativa, complicando la supervisión y el manejo general, y limitando la consolidación de la fumigación aérea y la efectividad de las medidas de bioseguridad. Finalmente, la expectativa original sobre el control de patógenos resultó ser incorrecta: el hongo TR4 está presente en todas las tierras de Mindanao. Este hecho, combinado con bioseguridad deficiente y erradicación inadecuada, ha incentivado la rápida diseminación de TR4 y Moko. Actualmente, grandes áreas de tierras altas han sido abandonadas y empresas como Del Monte han abandonado todas sus plantaciones en tierras altas concentrado su operación en tierras bajas con productores independientes y/o transformado en explotación piñera.



**Figura 1.** Suelo con 60 % de arcilla altamente compactado en condiciones de sequía. Filipinas 2023.

### **Innovación en Mejoramiento Genético: El Rol del GCTCV-218 (Formosana)**

El desarrollo de variedades de banano tolerantes ha sido una de las respuestas más significativas de la industria. El somaclón GCTCV-218 (Formosana), una variante de Cavendish, se convirtió en una pieza clave en la estrategia de recuperación en Filipinas junto con la expansión a tierras altas. Ensayos de campo entre 2012 y 2015 sugirieron su "buena tolerancia" a TR4, y empresas como Lapanday, Dole y Tadeco iniciaron rápidamente su producción y adopción masiva. Sin embargo, en uso comercial, el GCTCV-218 demostró bajos parámetros de producción, con una reducción de productividad de cerca del 40 % debido al pobre desempeño en parámetros como retorno, tolerancia a trastornos fisiológicos como mancha de madurez, pobre perfil de racimo y un rápido deterioro varietal a partir de la tercera o cuarta generación. Esto llevó a los productores a realizar inversiones en investigación para desarrollar nuevas selecciones no provenientes del somaclón GCTCV-218 (Formosana). Las empresas más importantes de Filipinas, como Dole, Unifarm, Tadeco y Sumifru, ya están utilizando de forma comercial sus propias nuevas selecciones mejoradas como sustitutos del GCTCV-218 con gran éxito. Pero estas variedades, al ser desarrolladas de forma privada, no están disponibles para los productores independientes o lo están, pero con serias restricciones. Algunas de estas variedades han demostrado retornos similares a Gran Enano con perfil de racimo similar a un Williams y rusticidad elevada, lo que les dan mayor tolerancia a plagas y enfermedades.

Hay al menos cuatro variedades con alto nivel de tolerancia a TR4 similar al GCTCV-218. Por otro lado, la postura del gobierno filipino hacia la innovación biotecnológica es relevante. En junio de 2024, Filipinas se posicionó a la vanguardia al aprobar las pruebas de variedades de banano Cavendish genéticamente editadas con la técnica CRISPR Cas9, una decisión que demuestra su disposición a adoptar tecnologías de vanguardia a pesar de ser vistas con escepticismo en otras naciones, pero que en el corto plazo pueden ofrecer alternativas que respondan a todas las necesidades.



**Figura 2.** Fruta de GCTCV-218 severamente afectada con mancha de madurez, Filipinas 2023.

### **El rol de otras enfermedades vasculares**

El declive de las áreas y el volumen de producción se atribuye normalmente y de forma exclusiva a la dispersión de TR4, pero no es la única enfermedad vascular presente. La bacteria del Moko (*Ralstonia solanacearum*) y el virus del Banana Bunchy Top (*BBTV*) también se han diseminado significativamente. Juntas, estas tres enfermedades son responsables de la constante y progresiva erradicación de unidades de producción, causando el diezmado de las plantaciones. Las tasas de pérdida de plantas por hectárea combinando las tres enfermedades pueden estar en el rango de 1.3 a 2.8 unidades de producción por Ha por semana, lo que significa que se pierde entre el 3 % y el 7 % de las unidades de producción anualmente por hectárea en las áreas con más difíciles condiciones técnicas y pobre manejo. Esto puede resultar en la pérdida de hasta un 30 % de la población total en cuatro años, en seis años esto puede llegar cerca del 50 % de la población perdida. Paradójicamente, en algunas áreas, en particular tierras altas donde, el áfido está presente, el Bunchy Top es más devastador que el

Moko y el TR4 juntos, donde el Bunchy top puede llegar a representar más del 60 % de las pérdidas de unidades productivas por sí solo.



**Figura 3.** Área con menos de cinco años de sembrada visiblemente diezmada por la combinación de TR4, Bunchy top y Moko.

### **Perspectivas**

El manejo de enfermedades en el cultivo del banano requiere un enfoque técnico sin esperar curas milagrosas como muchos buscan. No existe una vacuna para el Bunchy Top, Moko o el Fusarium, ni hay tratamientos curativos rentables basados en microorganismos o controles biológicos en especial donde no hay un riego efectivo. Por otro lado, específicamente en el caso del Fusarium, no es cierto que su presencia impida la continuidad del cultivo; por el contrario, sí se puede cultivar con éxito mediante la aplicación del paquete técnico adecuado y un manejo integrado. Si bien no hay una "bala de plata", ya existen tratamientos que demuestran la recuperación de unidades de producción sin requerir su erradicación total, lo cual representa una alternativa prometedora, aunque su eficacia a largo plazo aún esté por asegurarse. Igualmente está demostrado que suelos infectados con Fusarium pueden continuar siendo productivos con el manejo adecuado. La experiencia en Filipinas lo demuestra: no todos los productores han sido "barridos". Hay quienes mantienen un éxito significativo y sostenido, con altos rendimientos sostenidos y costos competitivos. Empresas como Tagum Agricultural Development Company Inc (Tadeco) han comprobado este éxito, produciendo de forma sostenible más de 3,200 cajas de 18.14 Kg por hectárea por más de 20 años, enfrentando los mismos desafíos climáticos, restricciones, regulaciones y la presencia de TR4, Moko y Bunchy Top. La clave para

superar estos retos reside en la implementación de un paquete técnico robusto, una bioseguridad eficaz, una gestión, supervisión y ejecución sólida y disciplinada. Estas estrategias deben incluir: Bioseguridad con enfoque en la prevención de la transmisión planta a planta, la disminución de la carga de inóculo en los suelos y el control de vectores (bióticos y abióticos). Junto con el correcto manejo de la cuarentena, erradicación controlada y microbioseguridad de focos infectados. Un programa de resiembra robusto (inter-varietal). Con un estricto manejo de períodos de barbecho junto con un sólido plan de salud del suelo. Sin olvidar y plan de cambios varietales y la ampliación en la aplicación e investigación de tratamientos curativos. Finalmente, es crucial que la industria bananera latinoamericana colabore estrechamente, uniendo a instituciones gubernamentales, academia e investigación para proteger la industria. Esto asegura que el banano siga siendo la fruta preferida a nivel mundial, confirmando que este no es el final, sino el comienzo de un nuevo ciclo de la industria.

## REFERENCIAS

- Bananotecnia. s.f. Filipinas pierde cuota de mercado de bananas en China frente a Vietnam. <https://bananotecnia.com/noticias/filipinas-pierde-cuota-de-mercado-de-bananas-en-china-frente-a-vietnam/>
- BusinessWorld Online. 2025. Disease dampens 2024 PHL banana exports. <https://www.bworldonline.com/economy/2025/01/14/646712/disease-dampens-2024-phl-banana-exports/>
- FAO. 2023. Banano – Análisis del mercado 2023. FAO Knowledge Repository. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/318cda0c-dae9-4c24-a8cb-44afd40b90c3/content>
- Tradeimex. s.f. Philippines Banana Exports Statistics: Suppliers & Exporters Data. <https://www.tradeimex.in/blogs/philippines-banana-exports-statistics>

## Evaluación *in vitro* de productos biorracionales sobre el crecimiento de la raza 1 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*

Ana Isabel Gómez-Cortés<sup>1</sup>, Verónica Guadalupe Rangel<sup>1</sup>, Manuel de Jesús Bermúdez-Guzmán<sup>\*2</sup>, Francisco Javier Delgado Virgen<sup>1</sup>, Mario Orozco Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México-Colima, México; <sup>2</sup>INIFAP-Campo Experimental Tecomán, Colima, México.

\*Autor de correspondencia:  
Manuel de Jesús Bermúdez-  
Guzmán  
bermudez.manuel@inifap.gob.  
mx

Contribución:  
Artículo Científico

Sección:  
Fitosanidad

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

Cita:  
Gómez-Cortés AI, Rangel VG,  
Bermúdez-Guzmán VJ,  
Delgado Virgen FJ, Orozco  
Santos M. 2026. Evaluación *in vitro* de productos biorracionales sobre el crecimiento de la raza 1 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 115  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26115>

### RESUMEN

Los cultivos de banano y plátano en México abarcan aproximadamente 80,000 hectáreas en 16 estados, generando más de 300,000 empleos anualmente. En Nayarit, las variedades Manzano (Silk, *Musa* AAB) y Thai (Pisang awak, *Musa* ABB) son gravemente afectadas por la raza 1 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, causante de la enfermedad de Marchitez por *Fusarium*. Debido a la falta de métodos de control efectivos, las plantaciones solo pueden mantenerse por dos años, obligando a los productores a buscar suelos nuevos, lo que resalta la urgencia de desarrollar estrategias de manejo que prolonguen su vida útil. El objetivo del trabajo fue evaluar *in vitro* la capacidad de tres productos biorracionales comerciales para inhibir el crecimiento de la raza 1 del hongo, aislado de plantas de banano infectadas en Nayarit. Los tratamientos analizados incluyen extracto de gobernadora (*Larrea tridentata*), *Bacillus amyloliquefaciens* y *Pseudomonas fluorescens*, en concentraciones del 0.01, 0.1 y 1 %. Se realizaron ensayos con discos de micelio y confrontaciones directas, con incubación a 30 °C durante siete días. Los datos, analizados mediante ANOVA y Prueba de Tukey, revelaron que el extracto de gobernadora al 1 % inhibió significativamente el crecimiento del hongo (92.9 %). Todas las concentraciones de *B. amyloliquefaciens* también inhibieron el crecimiento, mientras que *P. fluorescens* no mostró efecto inhibitorio. El extracto de gobernadora y *B. amyloliquefaciens* poseen potencial para el control *in vitro* de la raza 1 de Foc en variedades Manzano y Thai. Se realizarán estudios posteriores con plantas de plátano en vivero para validar estos resultados.

**Palabras clave:** Bacilos, Extractos vegetales, Foc, Inhibición, Marchitez

### ABSTRACT

Banana and plantain crops in Mexico cover approximately 80,000 hectares across 16 states, generating over 300,000 jobs annually. In Nayarit, the Manzano (Silk, *Musa* AAB) and Thai (Pisang awak, *Musa* ABB) varieties are severely affected by race 1 of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, the causative agent of Fusarium wilt disease. Due to the lack of effective control methods, plantations can only be maintained for two years, forcing producers to seek new soils, which highlights the urgent need to develop management strategies that extend their productive lifespan. The objective of this study was to evaluate *in vitro* the capacity of three commercial biorational products to inhibit the growth of the fungus race 1, isolated from infected banana plants in Nayarit. The treatments analyzed included *Larrea tridentata* extract, *Bacillus amyloliquefaciens*, and *Pseudomonas fluorescens*, at concentrations of 0.01, 0.1, and 1%. Assays were conducted using mycelial discs and confrontation tests, incubated at 30 °C



for seven days. Data analyzed through ANOVA and Tukey's test revealed that *Larrea tridentata* extract at 1% significantly inhibited fungal growth (92.9%). All concentrations of *B. amyloliquefaciens* also inhibited growth, whereas *P. fluorescens* showed no inhibitory effect. The extract of *Larrea tridentata* and *B. amyloliquefaciens* possess potential for in vitro control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 1 in Manzano and Thai varieties. Follow-up studies with banana plants in nursery conditions will be conducted to validate these results.

**Keywords:** Bacilli, Plant extracts, Foc, Inhibition, Wilt

## INTRODUCCIÓN

El cultivo del plátano (*Musa* spp.) constituye un pilar fundamental para la seguridad alimentaria y la economía en diversas regiones tropicales, especialmente en América Latina, África y Asia. La producción nacional de plátano (todas las variedades) fue de 2,405,891 toneladas en el año 2021 y es cultivado en 16 estados de la República Mexicana, de los cuales Chiapas, Tabasco y Veracruz tienen la mayor superficie sembrada de este cultivo y generaron en ese mismo año el 66 % del total de la producción nacional (SIAP, 2021).

La enfermedad de la marchitez es causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) y ha ocasionado grandes pérdidas en rendimiento a nivel mundial de aproximadamente 950,000 toneladas métricas de cultivo al año, afectando a los países productores de plátano (Ismaila *et al.*, 2022). Actualmente, es considerada una de las enfermedades más peligrosas que amenaza la producción mundial de este cultivo. El manejo de esta enfermedad comúnmente se ha realizado mediante el control químico con el uso de moléculas de grupos variados como imidazoles, triazoles, fungicidas protectores y de acción sistémica (Nel *et al.*, 2007; Orozco-Santos *et al.*, 2013). Los métodos de control químico presentan limitaciones como la resistencia de los patógenos, impactos ambientales negativos y riesgos para la salud humana (Cerna-Chávez *et al.*, 2019).

Alternativamente, el uso de productos biorracionales ha tenido mayor auge por no causar daños al medio ambiente. La gran mayoría de los trabajos publicados están enfocados en el control de Foc raza 4 por la amenaza potencial que representa para el cultivo del plátano. Algunos productos biorracionales que se han evaluado con elevados porcentajes de inhibición micelial para Foc R4 son el uso extractos de hojas de *Datura* y de *chirimoya*; ambos a dosis del 10 % presentaron un 85 % de inhibición (Mohana-Pradeep *et al.*, 2020). El uso de los productos biorracionales comerciales como PGPR Mix II, PGPM, *Trichoderma viride* y *Pseudomonas fluorescens* presentaron todos ellos 100 % de inhibición para Foc R4 (Lishma y Cherian, 2021). En

México, se ha evaluado el extracto de gobernadora (*Larrea tridentata*) para el control de Foc reportándose 100 % de inhibición micelial en condiciones *in vitro* (Rodríguez-Castro *et al.*, 2020). El presente estudio tuvo como objetivo la evaluación *in vitro* de tres productos biorracionales comerciales como estrategia potencial para el control de Foc raza 1.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Se utilizó la cepa FOCR1Nay01 de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, aislada de plátano manzano en Nayarit, México (Bermúdez-Guzmán *et al.*, 2025). Se realizaron bioensayos *in vitro* en medio de cultivo PDA (Agar de Patata-Dextrosa) suplementado con productos biorracionales. Se evaluaron tres productos comerciales: un extracto vegetal de gobernadora (*Larrea tridentata*) y dos formulaciones bacterianas, *Bacillus amyloliquefaciens* y *Pseudomonas fluorescens*. Se establecieron tres concentraciones para cada producto: 1, 0.1 y 0.01 %, con cuatro repeticiones por tratamiento, además de un testigo sin aplicación. Para los ensayos con Foc se utilizaron cajas Petri de 9 cm de diámetro y discos de micelio de 0.5 cm de diámetro.

La técnica utilizada dependió del tipo de producto. Para el extracto de gobernadora se aplicó la técnica de medio envenenado, incorporando el extracto en las concentraciones previamente definidas al medio PDA esterilizado, el cual posteriormente se vertió en las cajas Petri. Tras solidificar, se colocó en el centro el disco de hongo de Foc. Para el caso de los productos que contienen *B. amyloliquefaciens* y *P. fluorescens* se aplicó la técnica de confrontación uno a uno, colocando el inóculo bacteriano y el hongo en la misma placa, para observar la interacción directa entre ambos organismos. Todas las placas se incubaron a 30 °C durante siete días. Al término de este periodo, se midió el crecimiento micelial en cruz (dos mediciones perpendiculares) y se calculó un promedio de los diámetros, para posteriormente calcular el % de inhibición de cada promedio obtenido de los diámetros. El porcentaje de inhibición del crecimiento se determinó mediante la fórmula:

$$\% \text{ inhibición} = \frac{\text{crecimiento micelial testigo} - \text{crecimiento micelial tratamiento}}{\text{Crecimiento micelial testigo}} \times 100$$

Los datos se sometieron a ANOVA de una vía para comparar los tratamientos y cuando se detectaron diferencias significativas se realizó la prueba de Tukey a  $p < 0.05$ . El análisis se realizó con el software Infostat.

## RESULTADOS

En el Cuadro 1 se muestra la evaluación realizada con 3 productos biorracionales comerciales en relación a la inhibición de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* (Foc). Los resultados de la evaluación *in vitro* de estos productos revelaron diferencias significativas en su eficacia. El producto SERENADE ASO, formulado a base de *Bacillus amyloliquefaciens*, mostró un efecto moderado, alcanzando una inhibición entre 18-23 %. Aunque este valor indica cierta actividad antifúngica, no fue suficiente para considerarse un control sobresaliente en las condiciones evaluadas. Por otro lado, PROGRAMIC MEGA, que contiene extracto de gobernadora (*Larrea tridentata*), presentó una inhibición notable del 92.89 % a una concentración del 1 %, evidenciando un efecto inhibitorio fuerte contra *Foc* cuando se aplicó en esta concentración.

Sin embargo, su eficacia se redujo considerablemente al disminuir la concentración a 0.1 y 0.01 %, alcanzando inhibiciones menores, lo cual sugiere una dependencia de la concentración para su potencial control. Por último, el producto VITAL ROOT, basado en *Pseudomonas fluorescens*, no mostró capacidad de inhibir el crecimiento micelial en ninguna de las concentraciones evaluadas (0.01, 0.1 y 1 %), indicando que en estas condiciones no tiene efecto antifúngico notable contra *Foc*.

**Cuadro 1.** Porcentajes de inhibición de Foc a productos biorracionales con ingredientes activos de bacterias y extractos vegetales.

Producto	% Inhibición [1%]	% Inhibición [0.1%]	% Inhibición [0.01%]
PROGRAMIC MEGA (extracto de Gobernadora)	92.89 A	16.10 A	6.15 A
SERENADE ASO ( <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> )	23.46 B	19.90 A	18.48 B
VITAL ROOT ( <i>Pseudomonas fluorescens</i> )	0 C	0 B	0 C
Control (sin producto)	0 C	0.46 B	0 C

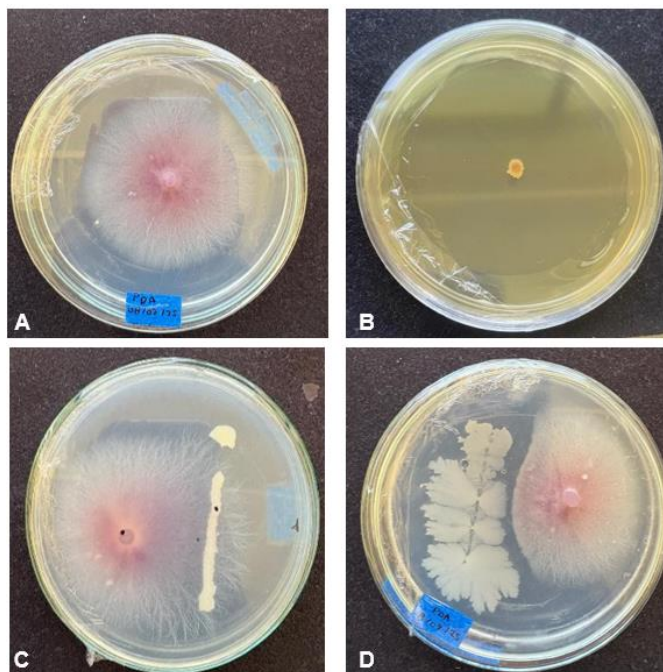
Las letras mayúsculas entre las columnas denotan diferencias significativas con Turkey al 0.05% de probabilidad.

Los análisis estadísticos realizados confirmaron que la inhibición observada con PROGRAMIC MEGA al 1 % fue significativamente mayor ( $p < 0.05$ ) comparada con los demás tratamientos y concentraciones, destacando su potencial como producto biorracional para el control de la enfermedad en fases iniciales o en futuras aplicaciones

en campo. Sin embargo, la eficacia moderada del *Bacillus* en este estudio sugiere que podrían requerirse formulaciones adicionales o combinaciones para optimizar su potencial antagonista.

En la figura 1 se muestra visualmente la inhibición de Foc con 3 productos biorracionales al 1 % de concentración. Resulta evidente el crecimiento nulo obtenido con el producto a base del extracto de gobernadora (Progranic Mega). El producto a base de *Pseudomonas fluorescens* (Vital Root) no inhibió el crecimiento de Foc, el cual creció traspasando las colonias de las bacterias, en tanto que el producto a base de *Bacillus amyloliquefaciens* si mostró inhibición a la cepa de Foc utilizada.

En un estudio realizado por Rodríguez-Castro *et al.* (2020), el extracto metanólico de *Larrea tridentata* (gobernadora) logró inhibir al 100 % el crecimiento micelial de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* (Foc) durante 240 horas, demostrando una alta eficacia en condiciones controladas. De manera similar, en este trabajo se obtuvo un elevado porcentaje de inhibición (93 %) utilizando un producto comercial a base de la misma planta, específicamente contra la raza 1 de Foc, lo cual refuerza la potencialidad de este extracto para el control de dicho patógeno. Por otra parte, Lishma y Cherian (2021) reportaron una inhibición del 100 % de Foc empleando una cepa de *Pseudomonas fluorescens*. Sin embargo, en el presente estudio, el producto comercial Vital Root, que también contiene *P. fluorescens*, no mostró inhibición sobre Foc raza 1. Esta diferencia puede deberse a que la efectividad de *P. fluorescens* varía según la cepa utilizada, ya que el trabajo de Lishma y Cherian no especifica la raza de Foc, además emplearon una cepa pura de la bacteria, mientras que en este estudio se utilizó un producto comercial que contiene además otros componentes, lo que puede influir en la actividad antagonista observada.



**Figura 1.** Crecimiento micelial de Foc contra productos biorracionales al 1 % de concentración después de 7 días de incubación. A) Control (Foc sin productos). B) Progranic Mega, C) Vital Root, D) Serenade ASO.

## CONCLUSIONES

El producto a base de *Larrea tridentata* mostró una alta eficacia *in vitro*, alcanzando casi un 93 % de inhibición del crecimiento de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 1 a la concentración del 1 %, demostrando su potencial para el control biológico. Por otro lado, el producto a base de *Bacillus amyloliquefaciens* presentó una inhibición moderada, mientras que *Pseudomonas fluorescens* en el producto comercial evaluado no mostró efecto inhibitorio en las condiciones estudiadas, lo que subraya la importancia de la cepa y la formulación en la eficacia de los agentes biológicos. Estos hallazgos respaldan el uso de extractos vegetales y formulaciones microbianas como estrategias potenciales, aunque es necesario validar su efectividad en plantas y condiciones de campo para su implementación en el control de la enfermedad en cultivos de banano.

## REFERENCIAS

- Rodríguez-Castro A, Torres-Herrera S, Calleros AD, Romero-García A y Silva-Flores M. 2020. Extractos vegetales para el control de *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani*, una alternativa sostenible para la agricultura. *Abanico Agroforestal*, 2(0), Article 0.
- SIAP, 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Consulta, noviembre de 2022.
- Ismaila AA, Ahmad K, Siddique Y, Wahab MAA, Kutawa AB, Abdullahi A, Zobir SAM, Abdu A, and Abdullah SNA. 2022. Fusarium Wilt of Banana: Current Update and Sustainable Disease Control Using Classical and Essential Oils Approaches. *Horticultural Plant Journal*.
- Nel B, Steinberg C, Labuschagne Nand Viljoen, A. 2007. Evaluation of fungicides and sterilants for potential application in the management of Fusarium wilt of banana. *Crop protection* 26:697-705.
- Orozco-Santos M, *et al.* 2013. La sigatoka negra y su manejo integrado en banano. Libro Técnico Núm. 1. SAGARPA, INIFAP, CIRPAC, Campo Experimental Tecomán. Tecomán, Colima, México. 152 p.
- Cerna-Chávez E, Alejandro-Rojas G, Ochoa-Fuentes YM, Aguirre-Uribe L, Landeros-Flores J y Hernández-Bautista O. 2019. Evaluación *in vitro* de principios activos de origen botánico para el control de hongos fitopatógenos. *Scientia Fungorum*, 49, e1245. <https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1245>
- Mohana-Pradeep RK, Kousalya S, Mukundhan P, Sheneka R, Rohini R, Vinitha S and Haritha S. 2020. Eco-friendly management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* causing Fusarium wilt on Banana under *In vitro* condition. 9, 3145–3148.
- Lishma NP, and Cherian AK. 2021. Effect of various bio control agents and plant extracts on the growth of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) causing Fusarium wilt disease in banana. *The Pharma Innovation Journal*, 10(12), 2454–2457.
- Bermúdez-Guzmán MJ, Orozco-Santos M, GarcíaMariscal K de la P, *et al.* 2025. Identificación de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 1 en banano manzano (*Musa* AAB, subgrupo Silk) en Nayarit, México. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 2(1): 101 <https://doi.org/10.62498/ARTC.25101>

## Biocontrol potential of the *Cryphonectria hypovirus 1* (CHV1) against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cupense* race 1

Laura Arango-Palacio<sup>1</sup>, María Dolores García-Pedrajas<sup>2</sup>, Carmen Cañizares-Nolasco<sup>2</sup>, Carlos Alberto Peláez Jaramillo<sup>3</sup>,  
Andrés Mauricio Pinzón-Núñez<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín-Antioquia 050022, Colombia, <sup>2</sup>Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea “La Mayora”, Universidad de Málaga, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IHSM-UMA-CSIC), Estación Experimental “La Mayora”, Avenida Dr. Wienberg s/n, 29750 Algarrobo-Costa, Málaga, España, <sup>3</sup>Universidad de Antioquia (UdeA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Grupo de Investigación Agrobiotecnología, Ciudad Universitaria, Medellín-Antioquia 050022, Colombia

\*Autor de correspondencia:  
Andrés Mauricio Pinzón-Núñez  
andresmpinzonn@gmail.com

Contribución:  
Artículo Científico

Sección:  
Fitosanidad

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

Cita:  
Arango-Palacio L, García-Pedrajas MD, Cañizares-Nolasco C, Peláez Jaramillo CA, Pinzón-Núñez AM. 2026. Biocontrol potential of the *Cryphonectria hypovirus 1* (CHV1) against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cupense* race 1. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 116 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26116>

### ABSTRACT

The incursion of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cupense* Tropical Race 4 (Foc TR4) in Latin America threatens global banana production, demanding innovative disease management tools. Mycoviruses have emerged as promising agents for sustainable fungal biocontrol. We assessed the hypovirulence effect of *Cryphonectria hypovirus 1* (CHV1) on *F. oxysporum* f. sp. *cupense* Race 1 (Foc R1) as a model. CHV1-infected strains showed reduced growth, altered pigmentation, and diminished virulence on ‘Gros Michel’ bananas compared to virus-free controls. This marks the first successful CHV1 introduction into Foc, highlighting mycoviruses as a powerful, eco-friendly approach with the potential to revolutionize the management of this devastating pathogen.

**Keywords:** *Fusarium oxysporum* f. sp. *cupense*, Mycovirus, Banana, CHV1, *Cryphonectria hypovirus 1*

### RESUMEN

La incursión de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cupense* Raza Tropical 4 (Foc R4T) en América Latina amenaza la producción mundial de banano, lo que exige herramientas innovadoras para el manejo de la enfermedad. Los micovirus han surgido como agentes prometedores para el biocontrol sostenible de hongos. Evaluamos el efecto de hipovirulencia de *Cryphonectria hypovirus 1* (CHV1) sobre *F. oxysporum* f. sp. *cupense* Raza 1 (Foc R1) como modelo. Las cepas infectadas con CHV1 mostraron menor crecimiento, alteraciones en la pigmentación y reducida virulencia en bananos ‘Gros Michel’ frente a controles libres de virus. Este es el primer registro exitoso de CHV1 en Foc, destacando a los micovirus como una estrategia ecológica con potencial para revolucionar el manejo de este patógeno devastador.

**Palabras clave:** *Fusarium oxysporum* f. sp. *cupense*, Micovirus, Banano, CHV1, *Cryphonectria hypovirus 1*



## INTRODUCTION

Bananas are considered one of the most important and influential tropical fruits worldwide, due to their high consumption, contribution to the economies of producing, exporting, and consuming countries, and fundamental in food security (FAO, 2024). However, one of the principal limitations of the crop is Fusarium wilt (FWB) the most devastating disease of the banana industry worldwide, caused by the soil-borne fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*), which colonizes and obstructs the vascular bundles, preventing the absorption of water and nutrients, generating wilting and consequently the death of the plant (Dita *et al.*, 2018). Viruses have been described with the capacity to infect phytopathogenic fungi, in which the viral infection has been associated with the alteration of phenotypic characters, the most relevant being the reduction of virulence (hypovirulence) (Nuss 2005). Hypovirulence was first successfully described in populations of *Cryphonectria parasitica*, the causal agent of chestnut blight (Choi and Nuss, 1992). *Chryphonectria hypovirus* 1 (CHV1) is a member of the virus family *Hypoviridae* and was the first mycovirus reported to cause hypovirulence in its host and is characterized by reduced growth, sexual and asexual reproductive ability, and virulence of the infected fungus (Choi and Nuss, 1992). According to Ye *et al.* (2023), disclosed the presence of 20 novel mycoviruses in the plant pathogenic fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, using a metatranscriptome-based strategy. However, no data have been reported on the possible effects of these mitoviruses on the phenotype of their host. Recently, Lin and collaborators (2024) published the first introduction of a novel hypovirulence-associated Hadaka virus 1 in *Foc*. In this study, we showed that the transformation process by protoplasts allowed expand hypovirus host range and studying hypovirus-mediated alterations in new fungal hosts, in this case, to one of the fungal phytopathogenic species of greatest economic importance in the world. This will generate knowledge for developing new biotechnological strategies for use within integrated disease management.

## MATERIALS AND METHODS

### Fungal Strains, Plasmid, and Plant Materials

Fungal strains were isolated from symptomatic banana plant tissue samples collected in the Urabá region of Antioquia, Colombia. All isolates were morphologically characterized and identified using PCR with specific primers for *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 1 (*Foc* R1), as described by Li *et al.* (2013). Among all identified isolates, the one that exhibited the highest degree of severity was selected based on the results of pathogenicity tests conducted on "Gros Michel" banana

plants. This strain was then used to introduce the CHV1 mycovirus via protoplast transfection, using the plasmid pXH9, which contains a full-length cDNA copy of *Cryphonectria hypovirus 1* (CHV1). Also, *F. verticillioides* (ID7856) and *F. solani* (ID0897) were included in the analysis as infected reference strains. All plants used for pathogenicity assays were grown in a climate-controlled plant growth room maintained at a temperature of  $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **Fungal Protoplast Isolation and Virus Transfection**

Protoplasts of the *Foc* R1 strain were prepared by treating mycelia grown on PDB (Potato Dextrose Broth, Difco Laboratories, Detroit, MI, U.S.A.). The mycelia were inoculated at a concentration of  $1 \times 10^8$  conidia/mL and incubated for 11-12 hours at  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  with shaking at 200 rpm. After incubation, the mycelia were filtered through a Miracloth membrane to collect fresh mycelium. Next, the collected mycelia were mixed with 20 mL of OM Buffer (1.2 M  $\text{MgSO}_4$  and 10 mM  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) containing 50 mg of Driselase and 1 g of Extralyse (InterSpex Products). This mixture was incubated for 3 hours at  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  with shaking at 50 rpm. Once protoplast formation was observed, the mixture was filtered through a  $40\text{ }\mu\text{m}$  nylon filter and washed with STC solution (10 mM Tris-HCl pH 7.5, 50 mM  $\text{CaCl}_2$ , 0.8 M Sorbitol) to collect the protoplasts. The collected protoplasts were then centrifuged for 15 minutes at 3000 rpm at  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The resulting pellet was resuspended in 300-400  $\mu\text{L}$  of STC solution. Protoplasts were counted at a 1:100 dilution and then centrifuged again for 5 minutes at 3000 rpm at  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Finally, the pellet was resuspended in an appropriate volume of STC to adjust the concentration to  $2\text{-}3 \times 10^8$  protoplasts/mL. Protoplast transfection was carried out using a modified version of previously described methods (Choi and Nuss, 1992). Each transformed organism was then individually transferred to PDA containing 50  $\mu\text{L}$  of hygromycin, followed by colony purification.

### **Detection of dsRNAs in *Foc* R1**

Infection of fungal isolates with CHV1 was tested by performing a RT-PCR on denatured dsRNAs using specific primers CHV1F2 and CHV1R3 proposed by Shapira *et al.*, (1991). Approximately 3.5 g of ground fungal tissue from each isolate was used to purify dsRNAs by chromatography on cellulose, following the methodology described by Valverde *et al.* (1990). Nucleic acids were electrophoretically fractionated on a 1.0% agarose gel.

### **Analysis of Fungal Vegetative Growth**

To assess the growth rate, 10  $\mu\text{L}$  of conidia suspensions containing  $1 \times 10^5$  conidia/mL from each strain were inoculated into the center of PDA Petri dishes. These

dishes were then incubated in the dark at 26 °C for 7 days. The radial growth was measured daily to determine the growth rate. In another experiment, 10 µL of PDB was inoculated with 10 µL of each transformant strain's inoculum, which also had a concentration of  $1 \times 10^5$  conidia/mL. This mixture was shaken at 200 rpm for 7 days at a temperature of 28 °C. After this incubation period, serial dilutions were performed at a ratio of 1:10, down to  $1 \times 10^{-2}$ . From the  $10^{-2}$  dilution, 10 µL was taken to count the conidia using a Neubauer chamber, and the desired concentration was then adjusted accordingly. To evaluate pigmentation, 10 mL of PDB were inoculated with three mycelium discs from each transformant strain preserved in 60% glycerol. These were then shaken for 7 days at 200 rpm at a temperature of 28 °C.

### **Phytopathogenicity Assay**

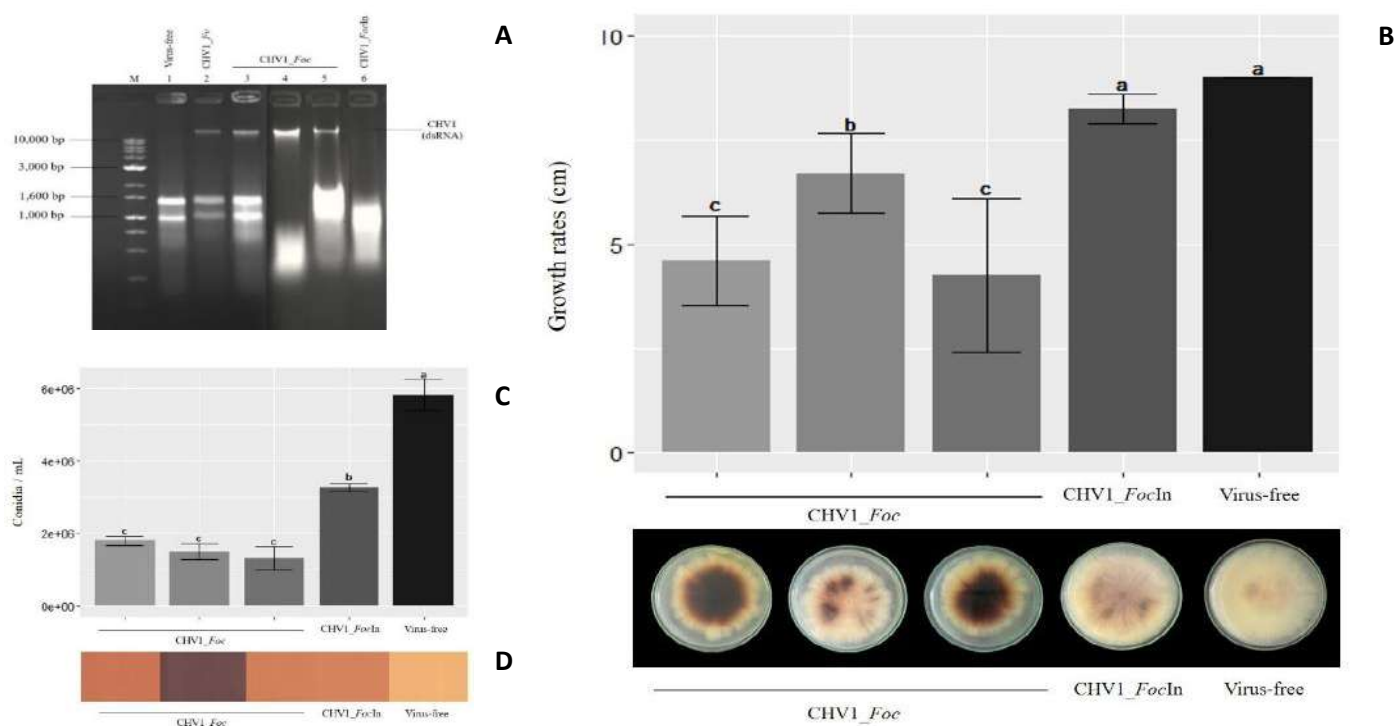
The virulence of infected and mycovirus-free strains towards “Gros Michel” banana seedlings (*Musa* spp.) was assessed in a greenhouse under controlled conditions. To conduct this experiment, agar discs of each transformant were placed onto PDA medium and incubated for 7 days at 28 °C. After incubation, 10 mL of ADE was added to each PDA Petri dish. Using a Digralsky loop, the mycelium was completely dissolved, and the resulting solution was poured into 300 g of previously hydrated rice that had been sterilized in an autoclave at 121 °C for 20 minutes. After the required colonization time, the rice was washed with ADE, filtered, and the resulting solution was collected in a beaker. A 1000 mL solution was ultimately prepared, achieving a  $1 \times 10^7$  conidia/mL concentration. Following the preparation of the inoculant suspensions, 20 “Gros Michel” banana seedlings were taken for each strain, with two biological replicates consisting of 10 repetitions each. Each plant was inoculated via drenching with 100 mL of inoculum at the concentration of  $1 \times 10^7$  conidia/mL. After four weeks, the first symptoms of the disease began to appear, and the severity was evaluated using the CORBANA diagrammatic scale.

## **RESULTS AND DISCUSSION**

### **Effect of CHV1 on colony morphology, mycelial growth, and pigmentation**

We successfully obtained fifteen hygromycin B-resistant transformants by transforming fungal protoplasts with the plasmid PXH9. The insertion of the CHV1 viral genome into a virus-free recipient *Foc* strain was confirmed by amplifying denatured dsRNAs using specific primers. Consequently, we identified ten distinct morphotypes, (data not shown), however, we selected four morphotypes that exhibited different levels of viral accumulation, to establish the assays (Figure 1A). The phenotypic changes observed in the virus-infected *Foc* strains (CHV1\_*Foc*) were

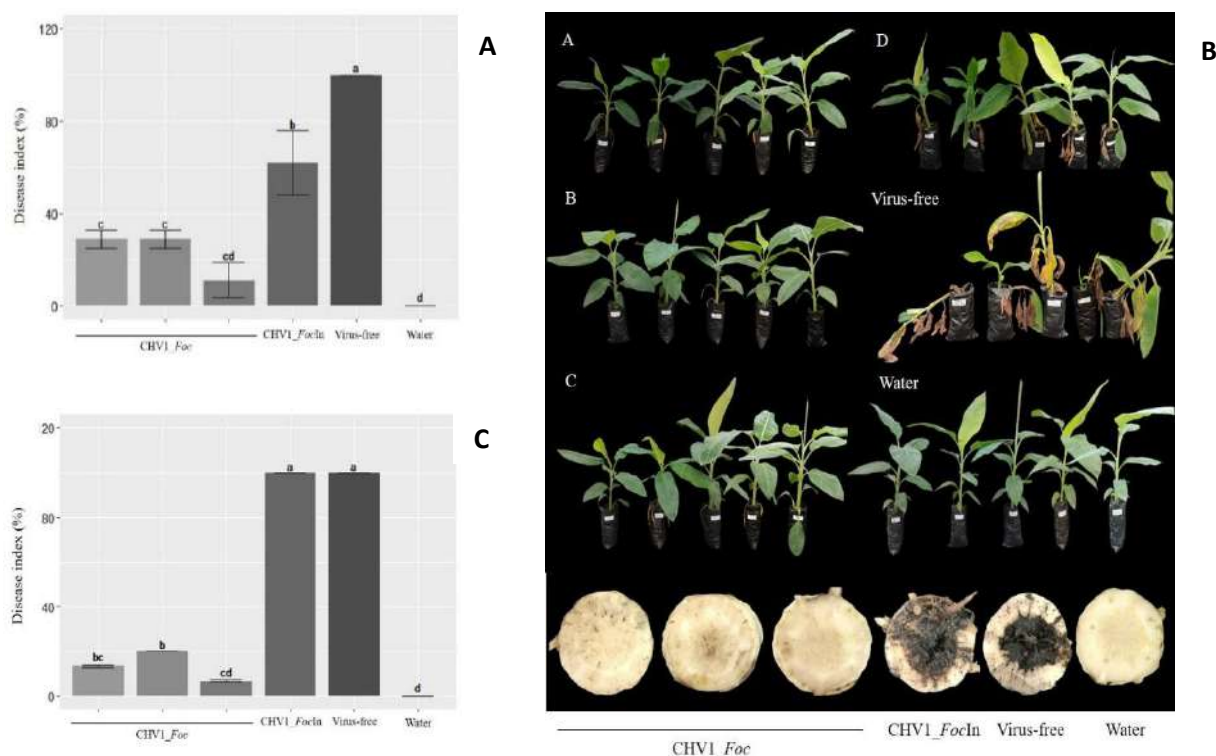
significantly different compared to the virus-free strain (Figure 1B). Briefly, on the PDA plates, the average growth rates of the transformants were 5.1 mm/day, while those of the virus-free strains were 9 mm/day. On the other hand, the CHV1\_*FocIn* morphotype refers to a transformant in which the CHV1 viral genome was not completely transferred, and it was used as a control. The recipient strains of *Foc* exhibited reduced growth rates and increased pigmentation compared to the virus-free strains (Figures 1B and D). When we compared the growth rates of conidia from freshly harvested serially diluted (10<sup>-2</sup>) samples, we observed a noticeable difference in growth rates between the virus-free strain and CHV1\_*FocIn* (Figure 1C).



**Figure 1.** Effect of CHV1 on colony morphology, mycelial growth, and pigmentation in *Foc*. A. Hygromycin B-resistant transformants were obtained by transforming the fungal protoplasts with the plasmid PXH9. RT-PCR analysis of dsRNA in fungal strains. Lane M, 1-kb ladder DNA size marker; Lane 1, virus-free strain; Lane 2, *Fusarium verticillioides* (reference strain) that is infected with CHV1; Lane 3, 4, and 5 virus-infected strains; Lane 6, virus not completely transferred. B. Growth rates and colony morphology of *Foc* as affected by transmission of dsRNA. C. CHV1 infection on conidia of *Foc*. D. Changes in pigmentation of *Foc* colonies. Different letters denote significant between treatments according to *Kruskal-Wallis* non-parametric tests at 5% probability.

### Hypovirulence of CHV1 on *Foc* R1

Assessing the pathogenicity of CHV1\_ *Foc* infected strains and virus-free strains on “Gros Michel” banana seedlings indicated that inoculation with virus-free strains induced larger lesions than virus-infected strains (Figure 2B). Notable differences were found in both internal and external symptoms compared to the virus-free strain (Figures 2A, and B). After 35 days post-inoculation (dpi), plants inoculated with the CHV1\_ *Foc* strain exhibited milder symptoms, compared to those inoculated with the virus. The latter displayed yellowing of the leaves and necrosis of the stem and rhizome, which are typical symptoms of the disease. The severity of wilt disease in leaves and bulbs was classified into fifteen and five grades, respectively, where grade 0 indicated no symptoms and fifteen and five grades indicated severe symptoms. This strongly indicates that CHV1 reduces the virulence of *Foc*.



**Figure 2.** Pathogenicity assessment of the indicated strains in “Gros Michel” banana seedlings A. Index of external symptoms of Fusarium wilt based on disease severity grades B. Leaf and bulb wilt symptoms observed in susceptible banana plants inoculated with the CHV1\_ *Foc* and Virus-free strain for 35 days C. Index of internal symptoms of Fusarium wilt based on disease severity grades. Different letters denote significant between treatments according to *Kruskal-Wallis* non-parametric tests at 5% probability.

The success of biological control depends on integrating multiple factors. Among the factors influencing the success of biological treatment, we can mention in first place vegetative incompatibility which reduces the horizontal transmission, which is considered as the most important parameter in models of pathogen invasion. This biological control method is very effective when the population structure of the *vic* genes of the parasitic fungus is known, and the compatible hypovirulent strains are applied (Rigling *et al.*, 1994).

Mycoviruses, ubiquitous in fungi, have become more readily discoverable with the advent of next-generation sequencing technology. However, the majority of mycoviruses establish latent infections, and only a small fraction exhibits noticeable symptoms, such as diminished virulence, slow growth rates, and impaired sporulation in their fungal hosts. Identifying hypovirulent properties in these mycoviruses is a time-consuming and labor-intensive process. In this study, we showed that the transformation process by protoplasts allowed expand hypovirus host range and studying hypovirus-mediated alterations in new fungal hosts, in this case, to one of the fungal phytopathogenic species of greatest economic importance in the world. This will generate knowledge for developing new biotechnological strategies for use within integrated disease management.

## CONCLUSIONS

Strains of *F. oxysporum* f. sp. *cubense* Race 1 infected by *Chryphonectria hypovirus* 1 showed reduced growth, altered pigmentation, and diminished virulence on ‘Gros Michel’ bananas compared to virus-free controls. This marks the first successful CHV1 introduction into Foc, highlighting mycoviruses as a powerful, eco-friendly approach with the potential to revolutionize the management of this devastating pathogen.

## REFERENCES

- Dita M, Barquero M, Heck D, Mizubuti ESG, and amp; Staver CP. 2018. Fusarium Wilt of Banana: Current Knowledge on Epidemiology and Research Needs Toward Sustainable Disease Management. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
- Choi GH, Nuss DL. 1992. A viral gene confers hypovirulence-associated traits to the chestnut blight fungus. *EMBO J* 11, 473–477, <https://doi:10.1002/j.1460-2075.1992.tb05077.x>
- FAO. 2024. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Foro Mundial Bananero. Disponible en: <https://www.fao.org/world-banana-forum/about-the-forum/fourth-conference/en/>
- Lin Y, Pan G, Qi Y, Wang B, Jin C, Fang W. 2024. A novel hypovirulence-associated Hadaka virus 1 (HadV1-LA6) in *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *mSphere* 0:e00428-24. <https://doi.org/10.1128/msphere.00428-24>

- 
- Nuss, D. 2005. Hypovirulence: Mycoviruses at the fungal–plant interface. *Nat Rev Microbiol* 3, 632–642. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1206>
- Shapira R, Choi GH, amp; Nuss DL. 1991. Virus-like genetic organization and expression strategy for a double-stranded RNA genetic element associated with biological control of chestnut blight. *The EMBO Journal*, 10(4), 731–739. <https://doi.org/10.1002/j.1460-2075.1991.tb08004.x>
- Rigling D, Heiniger U, Hohl HR. 1994. Reduction of laccase activity in dsRNA-containing hypovirulent strains of *Cryphonectria* (Endothia) parasitica. *Phytopathology*. 79:219–223. <https://doi.org/10.1094/Phyto-79-219>.
- Valverde RA, Nameth ST, Jordan RL. 1990. Analysis of doublestranded—RNA for plant-virus diagnosis. *Plant Disease* 74, 255–258, <https://doi.org/10.1094/PD-74-0255>.
- Ye L, Shi X, He Y, Chen J, Xu Q, Shafik K, Fu L, Yin Y, Kotta-Loizou I, Xu W. 2023. A novel botybirnavirus with a unique satellite dsRNA causes latent infection in *Didymella theifolia* isolated from tea plants. *Microbiology Spectr* 11:e00033-23. <https://doi.org/10.1128/spectrum.00033-23>

## Filogenómica como herramienta clave para la detección y respuesta temprana ante *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* raza 4 Tropical

Itzel Anayansi Solis García<sup>1\*</sup>, Karen Patricia Narciso Ortiz<sup>1</sup>, Lervin Hernández Ramos<sup>1</sup>, Ángel Ramírez Suárez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria (CNRF), México

\*Autor de correspondencia:  
Itzel Anayansi Solis García  
itzel.solis.i@senasica.gob.mx

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

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

**Cita:**  
Solis García IA, Narciso Ortiz KP, Hernández Ramos L, Ramírez Suárez A. 2026. Filogenómica como herramienta clave para la detección y respuesta temprana ante *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* raza 4 Tropical. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 117  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26117>

### RESUMEN

*Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* (Foc) es el agente causal de la marchitez por *Fusarium* del banano, una enfermedad de relevancia fitosanitaria que afecta a cultivos del género *Musa*. En México, al igual que en otros países, la raza 4 tropical (Foc R4T) es considerado un patógeno cuarentenario, lo que hace indispensable disponer de metodologías de identificación rápidas, precisas y confiables. En concordancia con las directrices de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), el Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria desarrolló e implementó un flujo de trabajo bioinformático para la detección y diferenciación de Foc R4T, que integra la secuenciación de genoma completo, el análisis filogenómico basado en polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) y la caracterización del perfil de genes secretados en el xilema (SIX). Este enfoque tiene como objetivo complementar el diagnóstico molecular y optimizar los tiempos de respuesta ante una posible incursión del patógeno. El flujo de trabajo fue puesto a prueba mediante el análisis de cinco aislados de Foc presentes en México, los cuales se agruparon con secuencias de referencia de Foc R1, con base en la filogenia basada en SNP y el perfil de genes SIX. Asimismo, el flujo fue evaluado mediante un ejercicio de simulación para estimar los tiempos de respuesta desde la secuenciación hasta el análisis bioinformático. En conjunto, estos resultados evidencian que la incorporación de herramientas genómicas fortalece la capacidad diagnóstica, de vigilancia y de preparación del CNRF ante una posible incursión de Foc R4T.

**Palabras clave:** Marchitez por *Fusarium*, Diagnóstico fitosanitario, Secuenciación genómica, Filogenómica basada en SNP

### ABSTRACT

*Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* (Foc) is the causal agent of *Fusarium* wilt of banana, a disease of phytosanitary relevance affecting crops of the genus *Musa*. In Mexico, as in many other countries, Tropical Race 4 (Foc TR4) is considered a quarantine pathogen, making it essential to have rapid, accurate, and reliable identification methodologies. In accordance with the guidelines of the International Plant Protection Convention (IPPC), the National Phytosanitary Reference Center developed and implemented a bioinformatic workflow for the detection and differentiation of Foc TR4, integrating whole-genome sequencing, SNP-based phylogenomic analysis, and characterization of the profile of secreted in xylem (SIX) genes. This approach aims to complement molecular diagnostics and optimize response times in the event of a potential pathogen incursion. The workflow was tested through the analysis of five Foc isolates present in Mexico, which clustered with reference sequences of Foc Race 1 based on SNP-based phylogeny and SIX gene profiles. Additionally, the workflow was evaluated through a simulation exercise to estimate response times from sequencing to bioinformatic analysis. Overall, these results demonstrate that the incorporation of genomic tools strengthens the diagnostic, surveillance, and preparedness capacity of the CNRF in the face of a potential incursion of Foc TR4.

**Keywords:** *Fusarium* wilt, Phytosanitary diagnostics, Genomic sequencing, SNP-based phylogenomics



## INTRODUCCIÓN

*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (E.F. Smith) Snyder y Hansen (Foc) es el agente causal de la marchitez por *Fusarium* del banano, una enfermedad que afecta a diferentes cultivares del género *Musa* (Yun *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2018).

Los aislados de Foc se agrupan en razas, basadas en su patogenicidad sobre distintos grupos de cultivares de banano (Edel-Hermann & Lecomte, 2019). Actualmente, se reconocen tres razas principales: raza 1 (R1) (Waite & Stover, 1960), raza 2 (R2) (Waite & Stover, 1960) y raza 4 (R4) (Su *et al.*, 1977). Foc R4 se subdivide en R4 subtropical (STR4), restringida a regiones subtropicales expuestas a condiciones de estrés como bajas temperaturas y sequías, y R4 tropical (R4T), capaz de causar enfermedad en condiciones tropicales y subtropicales (Czislowski *et al.*, 2018; Magdama *et al.*, 2019).

La importancia cuarentenaria de Foc R4T (VCG 01213-01216) en la mayoría de los países productores de banano ha sido ampliamente documentada (García-Bastidas *et al.*, 2020; Reyes-Herrera *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2018). Lo que resalta la importancia de contar con métodos de identificación rápida, precisa y confiable del patógeno como parte de la respuesta ante la amenaza de la enfermedad (Magdama *et al.*, 2019).

Ante esta situación, la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) estableció un Comité de Implementación y Desarrollo de Capacidades (IC) sobre Foc R4T, el cual elaboró el documento Directrices para la prevención, la preparación y la respuesta frente a *Fusarium* Raza 4 Tropical (R4T) de las musáceas (plátanos y bananos) (Secretaría de la CIPF, 2025).

Para el diagnóstico, se establece que, ante una primera detección sospechosa, debe realizarse en primer lugar la identificación molecular del patógeno mediante la amplificación por PCR punto final con *primers* específicos para Foc R4T VCG 01213/16, PCR tiempo real o PCR LAMP, seguida de la secuenciación de los amplicones y análisis filogenético para confirmar la identidad del aislado. Como segundo paso, se recomienda realizar una prueba para determinar el VCG del aislado o sustituir este análisis por la secuenciación del genoma completo. Finalmente, se deben completar estos análisis con los ensayos de patogenicidad empleando los postulados de Koch (Secretaría de la CIPF, 2025).

Considerando lo establecido por la CIPF, se elaboró un flujo de trabajo bioinformático para la detección molecular de Foc R4T, basado en la secuenciación de genoma completo y en un análisis filogenómico basado en polimorfismos de un solo

nucleótido (SNP). Este flujo de trabajo tiene como objetivo complementar el procedimiento de diagnóstico actualmente implementado en el Laboratorio de Micología del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria (CNRF), integrando información a nivel genómico que permita la identificación y diferenciación de las diferentes razas de Foc, así como optimizar los tiempos de respuesta diagnóstica ante una posible incursión del patógeno.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron cinco aislados de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) provenientes del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria. Los aislados se secuenciaron utilizando una plataforma de secuenciación de segunda generación, generando lecturas pareadas para su posterior análisis bioinformático.

### Análisis filogenómico e identificación de genes SIX

Los genomas obtenidos se analizaron mediante un flujo de trabajo bioinformático orientado a la evaluación de calidad, ensamble *de novo* y validación de los ensamblados.

Para el análisis filogenómico, los ensamblados del CNRF se compararon con genomas de referencia de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* representativos de distintas *formae speciales* y razas de Foc, disponibles en bases de datos públicas.

A partir del genoma central se infirió una filogenia, lo que permitió establecer la relación filogenómica de los aislados analizados y su asignación a nivel de raza. De manera complementaria, se estimó la identidad nucleotídica promedio como criterio adicional de comparación genómica.

De forma complementaria, se realizó la caracterización del perfil de genes secretados en el xilema (SIX), como un criterio adicional para apoyar la diferenciación entre Foc R1/R2/STR4 y Foc TR4.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

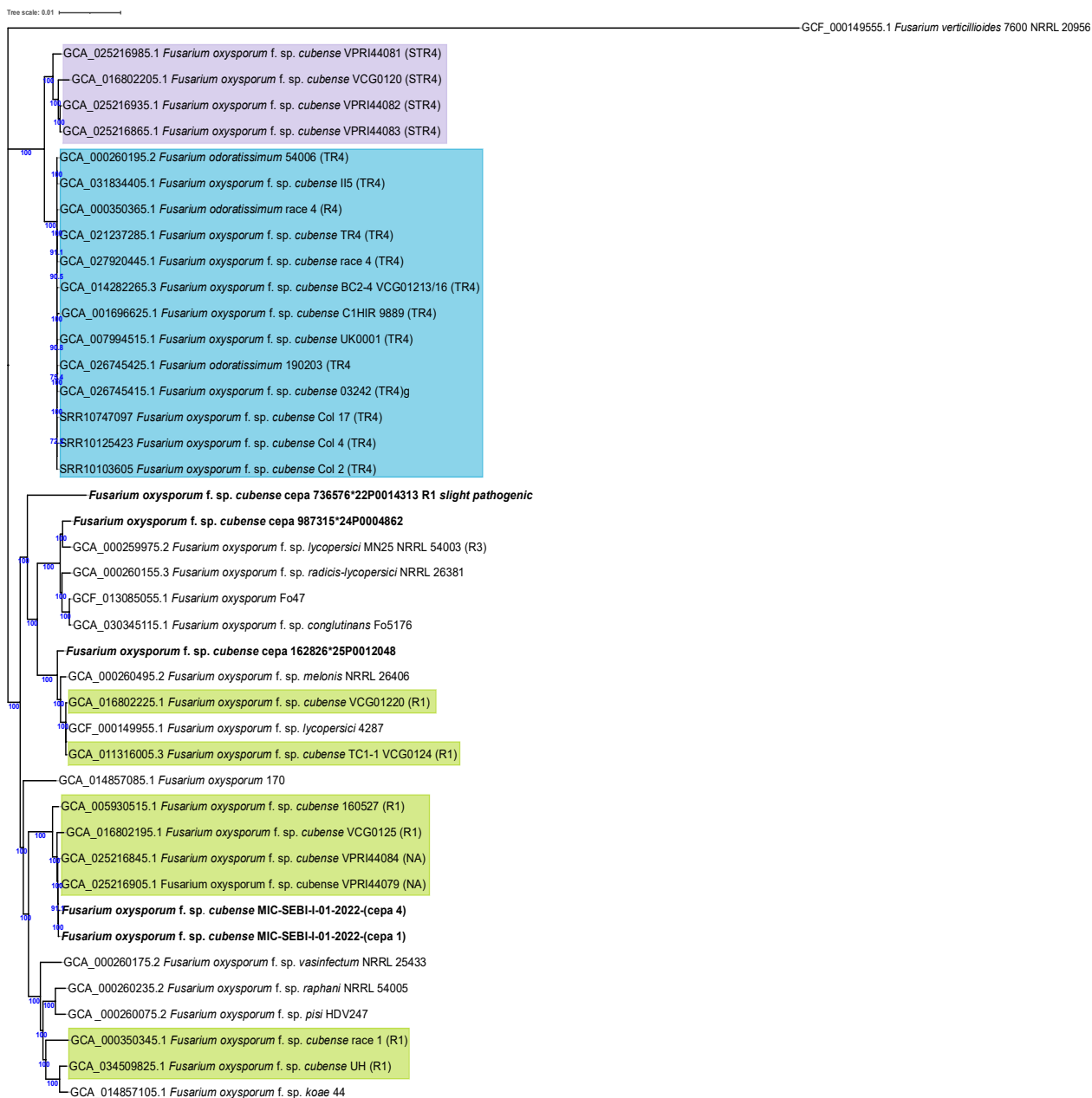
El CNRF desarrolló e implementó un flujo de trabajo para la detección y diferenciación de Foc R4T, que integra la secuenciación de genoma completo, el análisis filogenómico basado en polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) y la caracterización del perfil de genes SIX. Este enfoque combinado permite diferenciar las diferentes razas de Foc de importancia fitosanitaria.

El flujo de trabajo fue puesto a prueba mediante el análisis de aislados de Foc presentes en México, con el objetivo de evaluar su desempeño en la tipificación de

cepas y contribuir al conocimiento de la diversidad genética de Foc en el país. Los cinco aislados analizados hasta el momento se agruparon con secuencias de referencia de Foc R1, con base en la filogenia basada en SNP (Figura 1) y el perfil de genes SIX, lo cual confirma la concordancia entre los distintos enfoques genómicos empleados.

Si bien las razas de Foc distintas a R4T no tienen el mismo nivel de agresividad, su presencia representa un riesgo fitosanitario relevante, ya que pueden afectar cultivos de banano y plátano de importancia agroalimentaria y económica en México. En este contexto, la caracterización genómica de cepas locales es clave para la vigilancia fitosanitaria y el diagnóstico diferencial.

Adicionalmente, el flujo de trabajo fue evaluado en un ensayo de simulación con el propósito de estimar los tiempos de respuesta desde la secuenciación hasta la generación de resultados, en un escenario de posible incursión de Foc R4T. Este ejercicio representa un paso estratégico en la preparación del CNRF para responder de manera oportuna ante una emergencia fitosanitaria.



**Figura 1.** Inferencia filogenómica de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* basada en SNP. Los colores indican las diferentes razas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*: R1 (verde), R4T (azul) y STR4 (lila). Los aislados analizados mediante el flujo de trabajo propuesto se resaltan en color negro.

## CONCLUSIONES

En conjunto, los resultados demuestran que la integración de secuenciación genómica, análisis filogenómico y caracterización de genes SIX fortalece la capacidad diagnóstica y de respuesta del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria para la detección, diferenciación y respuesta temprana ante patógenos de alto impacto, contribuyendo a la protección de la producción nacional de banano y plátano.

## REFERENCIAS

- Czislowski E, Fraser-Smith S, Zander M, O'Neill WT, Meldrum RA, Tran-Nguyen LTT, Batley J and Aitken EAB. 2018. Investigation of the diversity of effector genes in the banana pathogen, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, reveals evidence of horizontal gene transfer. *Molecular Plant Pathology* 19(5), 1155–1171. <https://doi.org/10.1111/mpp.12594>
- Edel-Hermann V and Lecomte C. 2019. Current Status of *Fusarium oxysporum* Formae Speciales and Races. *Phytopathology*® 109(4), 512–530. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-18-0320-RVW>
- García-Bastidas FA, Quintero-Vargas JC, Ayala-Vasquez M, Schermer T, Seidl MF, Santos-Paiva M, Noguera AM, Aguilera-Galvez C, Wittenberg A, Hofstede R, Sørensen A and Kema GHJ. 2020. First Report of Fusarium Wilt Tropical Race 4 in Cavendish Bananas Caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *Plant Disease* 104(3), 994–994. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-1922-PDN>
- Magdama F, Monserrate-Maggi L, Serrano L, Sosa D, Geiser DM, Jiménez-Gasco MdelM. 2019. Comparative analysis uncovers the limitations of current molecular detection methods for *Fusarium oxysporum* f. Sp. *cubense* Race 4 strains. *PLoS ONE* 14(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222727>
- Reyes-Herrera PH, Torres-Bedoya E, Lopez-Alvarez D, Burbano-David D, Carmona SL, Bebbler DP, Studholme DJ, Betancourt M and Soto-Suarez M. 2023. Genome sequence data reveal at least two distinct incursions of the Tropical Race 4 variant of Fusarium wilt into South America. *Phytopathology* 113(1), 90–97. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-22-0034-R>
- Secretaría de la CIPF. 2025. Directrices para la prevención, la preparación y la respuesta frente a Fusarium Raza 4 Tropical (R4T) de las musáceas (plátanos y bananos). FAO en nombre de la Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria. <https://doi.org/10.4060/cc4865es>
- Su HJ, Chuang TY and Kong WS. 1977. Physiological race of fusarial wilt fungus attacking Cavendish banana of Taiwan. *Taiwan Banana Res. Inst. Spec. Publ* 2(21), 814–818.
- Waite BH and Stover RH. 1960. Studies on fusarium wilt of bananas: vi. variability and the cultivar concept in *Fusarium oxysporum* f. *cubense*. *Canadian Journal of Botany* 38(6), 985–994. <https://doi.org/10.1139/b60-087>
- Yun Y, Song A, Bao J, Chen S, Lu S, Cheng C, Zheng W, Wang Z and Zhang L. 2019. Genome Data of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Race 1 and Tropical Race 4 Isolates Using Long-Read Sequencing. *Molecular Plant-Microbe Interactions*® 32(10), 1270–1272. <https://doi.org/10.1094/MPMI-03-19-0063-A>
- Zheng SJ, García-Bastidas FA, Li X, Zeng L, Bai T, Xu S, Yin K, Li H, Fu G, Yu Y, Yang L, Nguyen HC, Douangboupha B, Khaing AA, Drenth A, Seidl MF, Meijer HJG and Kema GHJ. 2018. New geographical insights of the latest expansion of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 into the greater mekong subregion. *Frontiers in Plant Science* 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00457>

## Producción de banano libre de nematocidas: rol de ensilados con microbiota nativa en el manejo integral de nematodos

Jorge Luis Sandoval-Solís<sup>\*</sup>, Tatiana Zamora-Araya<sup>1</sup>, Roddy Ortega-Bonilla<sup>1</sup>, Rafael Segura-Mena<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dirección de Investigaciones, Eje Relación Suelo-Planta, Corporación Bananera Nacional (CORBANA)

**\*Autor de correspondencia:**

Jorge Luis Sandoval-Solís  
jlsandoval@corbana.co.cr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**  
Sandoval-Solís JL, Zamora-Araya T, Ortega-Bonilla R, Segura-Mena R. 2026. Producción de banano libre de nematocidas: rol de ensilados con microbiota nativa en el manejo integral de nematodos. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 118 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26118>



### RESUMEN

Durante seis años se llevó a cabo un experimento en una finca comercial con el objetivo de evaluar un manejo alternativo del nematodo barrenador (*Radopholus similis*). Se establecieron tres tratamientos: T1. Manejo convencional de finca. T2. Rotación de nematocidas + aplicación de pasto ensilado con microbiota nativa extraída de la finca (MN) + consorcio microbiano (CM) (*Trichoderma* sp. (T-05) y *Purpureocillium lilacinum* (PI-11) a una dosis de 500 g planta<sup>-1</sup> cada 4 meses. T3. Sin nematocidas + pasto ensilado con MN + CM. Se evaluó el peso de raíz total y funcional (g), porcentaje de raíz funcional (%RF), cantidad de *R. similis*, nematodos totales en 100g de raíz y peso de racimo (kg). El T3 alcanzó para el cuarto y quinto año promedios de 33,0 y 28,6 g de raíz/planta respectivamente, siendo superior ( $p > 0,0055$ ) al T1. No se presentaron diferencias significativas para la variable de %RF ( $p < 0,0505$ ) durante el experimento. Sin embargo, se registraron porcentajes superiores al 80 % entre tratamientos. El T1 y T2 formaron racimos con un peso similar ( $p = 0,9124$ ) promedio de 27,75 kg. En contraste con 26,0 kg para el T3 ( $p < 0,0002$ ). Sin embargo, el T3 demostró una tendencia al aumento llegando a estabilizarse en los últimos ciclos de cultivo con pesos promedio de 27,8 kg. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar el potencial de los ensilados enriquecidos con microbiota nativa como agentes supresores de nematodos y estimulante radical.

**Palabras clave:** Bioestimulantes, Raíz funcional, Rizósfera, *Radopholus similis*, Sanidad radical

### ABSTRACT

An experiment was conducted over six years on a commercial farm with the aim of evaluating an alternative management strategy for the burrowing nematode (*Radopholus similis*). Three treatments were established: T1. Conventional farm management. T2. Rotation of nematicides + application of silage grass with native microbiota extracted from the farm (NM) + microbial consortium (MC) (*Trichoderma* sp. (T-05) and *Purpureocillium lilacinum* (PI-11) at a dose of 500 g plant<sup>-1</sup> every 4 months. T3. No nematicides + silage grass with NM + MC. Total and functional root weight (g), functional root percentage (%FR), amount of *R. similis*, total nematodes in 100 g of root, and bunch weight (kg) were evaluated. T3 reached averages of 33.0 and 28.6 g of root/plant for the fourth and fifth year, respectively, which was higher ( $p > 0.0055$ ) than T1. There were no significant differences for the %FR variable ( $p < 0.0505$ ) during the experiment. However, percentages above 80% were recorded between treatments. T1 and T2 formed bunches with a similar average weight ( $p = 0.9124$ ) of 27.75 kg. This contrasts with 26.0 kg for T3 ( $p < 0.0002$ ). However, T3 showed an upward trend, stabilizing in the last crop cycles with average weights of 27.8 kg. The results obtained demonstrated the potential of silage biostimulants enriched with native microbiota as nematode suppressive agents and root promoters.

**Keywords:** Biostimulants, Functional root, *Radopholus similis*, Root health, Rhizosphere

## INTRODUCCIÓN

El nematodo barrenador *Radopholus similis* es uno de los fitoparásitos de mayor importancia económica en las regiones tropicales y subtropicales del mundo siendo el cultivo de banano su principal hospedero (Sikora *et al.*, 2018). El uso de cultivares de exportación del subgrupo Cavendish (*Musa* AAA) como Grande Naine, Williams y Valery favorecen su presencia, ya que son muy susceptibles al ataque de esta plaga (Vargas *et al.*, 2006). El combate del patógeno se ha basado principalmente en la aplicación de nematicidas no fumigantes sobre la superficie del suelo. No obstante, se conocen sus efectos adversos sobre el medio ambiente y la biodiversidad del suelo (Vargas *et al.*, 2015). Asimismo, la creciente demanda de restricciones en los mercados internacionales regula su uso. Por lo tanto, es preponderante la búsqueda de estrategias más amigables con el ambiente para combatir los nematodos y mantener la productividad de las fincas.

La Dirección de Investigaciones de la Corporación Bananera Nacional (CORBANA) ha desarrollado investigación científica enfocada en la integración de buenas prácticas agrícolas, la promoción de la salud y la biodiversidad del suelo, como mecanismo para aumentar la salud y calidad de estos mejorando su resiliencia al aumento de fitonematodos y la aparición de patógenos como alternativa al manejo convencional basado en moléculas químicas nematicidas (Ureña *et al.*, 2017) (Sandoval *et al.*, 2020). Cabe destacar, el uso de microorganismos antagonistas y enmiendas tanto minerales como orgánicas compuestas de pasto ensilado con microbiota rizosférica, biocarbón, abonos orgánicos y polvos de roca volcánica (Torres *et al.*, 2019).

La transición de los enfoques actuales de producción a otros de índole alternativa para abordar los desafíos y las demandas de los mercados internacionales son una necesidad (Dita *et al.*, 2014). El objetivo del presente trabajo fue evaluar si la estimulación de la microbiota nativa de un suelo conductivo e inoculación recurrente de un consorcio microbiano es capaz de disminuir la habilidad de infestación y agresividad de *R. similis* y sus efectos dañinos sobre la cantidad de raíz y su sanidad. Lo anterior buscando impacto científico, ambiental y social en el transcurso del tiempo para un manejo más sostenible del cultivo, con beneficio para el productor y el consumidor.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo durante seis años (2018 al 2023) en una plantación comercial de banano Subgrupo Cavendish, cultivar ‘Gran Enano’ (*Musa* AAA),

ubicada en el cantón de Siquirres, provincia de Limón, Costa Rica (10°06'36.0"N 83°22'48.0"W). La finca se ubica en la zona de vida determinada como bosque muy húmedo premontano (Holdridge, 1978). Se trabajó mediante un diseño experimental de bloques completamente al azar (DBCA), con tres tratamientos y ocho repeticiones. El sitio experimental consistió en un arreglo espacial de siembra en hexágonos para una densidad promedio de 1800 plantas/ha (González *et al.* 2011) con un área de evaluación total de 3.2 hectáreas. El análisis estadístico se realizó calculando las medias aritméticas anuales de las variables evaluadas. Los datos se sometieron a un análisis con el paquete nlme (Pinheiro *et al.* 2023) y emmeans (Lenth, R. 2023) de R (R Core Team, 2023).

Se establecieron tres tratamientos enfocados al control del nematodo barrenador (*R. similis*) y a la promoción y estímulo en la formación del sistema radical: T1. Manejo convencional de finca (2-3 aplicaciones nematicida al año). T2. Rotación de nematicidas + aplicación de pasto ensilado con microbiota nativa + consorcio microbiano a una dosis de 500 g/planta cada 4 meses. T3. Sin nematicidas + pasto ensilado con microbiota nativa + consorcio microbiano (500g/planta/4meses). La elaboración del pasto ensilado consistió en una adaptación de la metodología descrita por Torres (2014) donde se reemplazó mantillo de bosque como aditivo biológico para la fermentación del ensilaje por suelo conductivo de la finca para estimular su microbiota nativa en combinación con un consorcio microbiano compuesto de *Trichoderma* sp. (T-05) y *Purpureocillium lilacinum* (PI-11) elaborado por el Laboratorio de Control Biológico y Biología Molecular de CORBANA.

### **Salud radical y nematofauna**

Para cuantificar las variables de salud radical se realizaron muestreos mensuales de raíz de acuerdo con la metodología desarrollada por Araya (2002), donde se determinó el peso de raíz total (g), raíz funcional (g) y el porcentaje de raíz funcional (%). Para la extracción de los nematodos fitoparásitos provenientes de muestras de raíz, se utilizó el método de Taylor y Loegering (1953) adaptado por el laboratorio de Nematología de CORBANA (Araya, 2002).

### **Variables productivas**

Se evaluó el peso del racimo (kg) durante seis ciclos de producción con una romana electrónica Crane Scale de  $100,0 \pm 0,1$  kg. Además, se determinó índice de área foliar, la circunferencia de la planta madre (cm) medida a un metro de altura tomando la base del suelo como punto de partida y la altura del hijo de sucesión, desde la base del suelo hasta la última hoja emitida. Por último, se cuantificó el número de manos por racimo.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Salud radical y nematofauna

La cantidad de raíz total en los primeros tres años del experimento osciló entre 20,1 y 34,1 g por planta sin presentar diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,1018$ ). Para el cuarto y quinto año, la aplicación de ensilados con microbiología benéfica (T3) presentó 33,0 y 28,6 g de raíz/planta respectivamente, siendo estadísticamente superior ( $p > 0,0055$ ) (Cuadro 1). Para la variable porcentaje de raíz funcional no se presentaron diferencias significativas ( $p < 0,0505$ ) durante el experimento. Sin embargo, se registraron porcentajes superiores al 80 % entre tratamientos (Cuadro 1). Los conteos del nematodo barrenador (*R. similis*) revelaron que la cantidad de individuos por cada 100 g de raíz variaron de los 10 605 a los 25 357 individuos ( $p > 0,0812$ ) a lo largo del experimento (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Promedio anual de las variables de sanidad radical evaluadas en una finca comercial de banano (*Musa* AAA), Finca San Pablo, Siquirres, Costa Rica. 2018-2023.

Año	Tratamiento	Raíz total (g / planta)	Raíz funcional (%)	Raíz funcional (%)	<i>Radopholus similis</i> individuos / 100 g de raíz	Nematodos totales
2018	1	33,5 a	29,2 a	86,3 a	14 400 a	17 933 a
	2	30,2 a	25,2 a	83,5 a	19 889 a	22 796 a
	3	34,1 a	28,5 a	82,9 a	20 027 a	24 397 a
	N.S.					
2019	1	23,0 a	19,6 a	85,4 a	14 318 a	19 616 a
	2	22,7 a	20,1 a	86,9 a	12 157 a	18 532 a
	3	25,2 a	21,2 a	83,7 a	21 548 b	25 831 b
	N.S.				***	**
2020	1	20,1 a	16,5 a	82,4 a	10 605 a	15 385 a
	2	23,6 a	20,1 b	84,4 a	11 800 a	18 360 ab
	3	20,4 a	17,2 ab	83,0 a	16 132 a	24 033 b

	N.S.		*			*
2021	1	25,4 a	20,9 a	82,3 a	16 045 a	21 181 a
	2	28,5 ab	24,3 ab	84,7 a	18 065 a	23 690 ab
	3	33,0 b	28,4 b	84,4 a	20 061 a	25 918 b
	N.S.	**	**			*
2022	1	23,2 a	20,0 a	85,4 a	10 991 a	15 311 a
	2	23,4 a	20,1 a	85,5 a	11 623 a	15 700 a
	3	28,6 b	24,2 b	83,7 a	24 937 b	30 811 b
	N.S.	***	***		***	***
2023	1	31,4 a	25,1 a	80,0 a	25 357 a	31 854 a
	2	32,6 a	27,2 a	82,5 a	20 711 a	31 518 a
	3	33,2 a	27,4 a	80,7 a	22 575 a	31 854 a
	N.S.					

N.S.: Nivel de significancia. Medias con la misma letra no son diferentes significativamente (Tukey,  $p < 0,05$ ). Códigos de significancia: 0 ‘\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*’ 0,01 ‘\*’ 0,05.

En el primer y segundo año se determinó que, a mayor porcentaje de raíz funcional, menor fue el número de nematodos por 100 g de raíz (Cuadro 1). Autores como (Serrano, 2005) y (Jaramillo *et al.* 2019) señalaron que esta condición es clave para favorecer la absorción de agua y nutrientes, además de lograr racimos de mayor peso, ratio y retorno. Este comportamiento fue observado en los primeros dos ciclos de cultivo donde el T1 y T2 reflejaron pesos de racimo de hasta 30 kg (Figura 1).

Las aplicaciones de pasto ensilado con microbiota nativa en T2 y T3 estimularon la formación de raíz total y funcional, lo cual incrementó la diferencia con el manejo convencional (T1) conforme avanzó el tercer, cuarto y quinto año del experimento, aunque no incidió en el porcentaje de raíz funcional. Resultados similares obtuvieron (Crespo *et al.* 2023), quienes concluyeron que la inoculación al suelo de un consorcio de rizobacterias incrementó la cantidad de raíces y redujo las poblaciones de *R. similis* en el cultivo de banano. Esto pudo deberse a que los bioestimulantes aplicados

generaron condiciones desfavorables para la reproducción de los nematodos (Torres *et al.*, 2019).

El tratamiento T2 demostró que una adecuada rotación de nematicidas en conjunto con buenas prácticas agrícolas es una alternativa recomendada para un adecuado control de nematodos a largo plazo sin un detrimento en la producción (Vargas y Araya, 2018). Dicha afirmación es respaldada por (Moens *et al.* 2004), quienes indicaron que el uso repetitivo de una sola molécula nematicida aumenta el daño ocasionado por los nematodos, mientras que una rotación de nematicidas los mantiene bajo control, reduciendo la probabilidad de desarrollar una biodegradación acelerada.

Asimismo, cabe destacar el potencial de los ensilados enriquecidos con microbiota nativa y benéfica como agente supresor de nematodos y estimulador radical, resultados que evidencian que es posible un manejo integral de los nematodos sin el uso de nematicidas. Este resultado ofrece un panorama promisorio para hacer frente a las constantes restricciones en el uso de agentes de control convencional. Los resultados obtenidos en T3 evidencian que es clave estimular la salud radical con el fin de obtener porcentajes de raíz funcional superiores al 80 % para contrarrestar el ataque de los nematodos. Torres *et al.* (2023) indicaron que este aspecto es fundamental, ya que la condición endoparásita de *R. similis* limita su control. El fomentar la raíz funcional permite que estos no logren expresar su máxima agresividad.

### **Variables productivas**

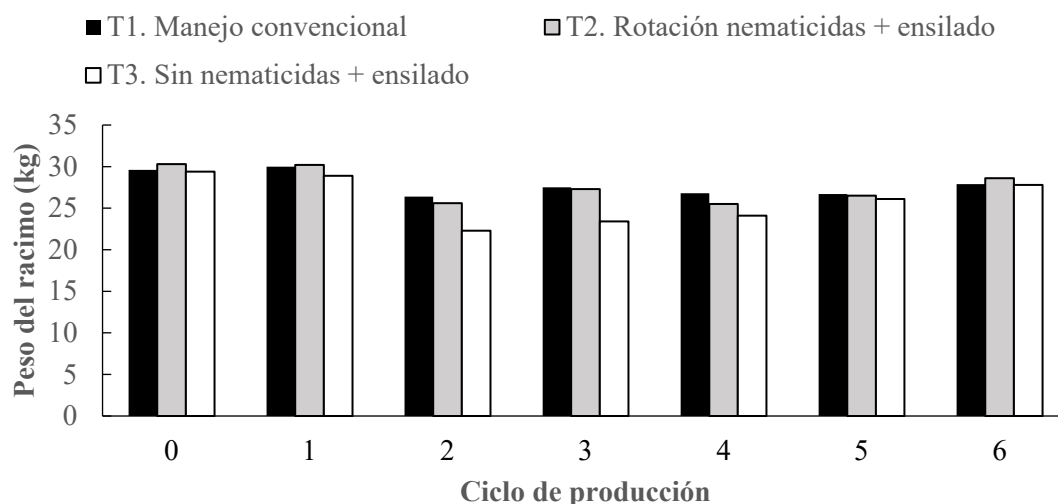
Los tratamientos T1 y T2 formaron racimos con un peso similar ( $p=0,9124$ ) promedio de 27,7 kg. En contraste, la aplicación de ensilados + consorcio (T3) como único método de control de poblaciones de nematodos mostró los menores promedios con 26,0 kg ( $p<0,0002$ ) (Cuadro 2), promedio de 6,9 manos por racimo, lo que fue estadísticamente inferior ( $p<0,0031$ ) a la media de 7,1 manos que generaron los tratamientos T1 y T2 ( $p=0,8565$ ) (Cuadro 2). Los tratamientos T1 y T2 obtuvieron un índice de área foliar similar ( $p=0,9511$ ) que fue en promedio de 24,8, en comparación con el tratamiento T3 con un índice de 23,8 ( $p<0,0012$ ) (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Promedio general de las variables de producción de plantas evaluadas en una finca comercial de banano (*Musa* AAA), Finca San Pablo, Siquirres, Costa Rica. 2018-2023.

Tratamiento	Peso del racimo (kg)	Número de manos	Índice de área foliar	Calibre segunda mano	Calibre última mano	Longitud segunda mano	Longitud última mano
				(mm)		(cm)	
T1	27,8 a	7,13 a	24,9 a	43,41 a	40,38 a	25,43 a	21,28 a
T2	27,7 a	7,16 a	24,8 a	43,42 a	40,34 a	25,38 ab	21,31 a
T3	26,0 b	6,91 b	23,8 b	43,32 a	40,37 a	25,25 b	21,27 a
N.S.	***	**	**			*	

N.S.: Nivel de significancia. Medias con la misma letra no son diferentes significativamente (Tukey,  $p < 0,05$ ). Códigos de significancia: 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0,01 '\*\*' 0,05.

Las diferencias de peso del T1 y T2 en comparación con los ensilados (T3) pueden estar asociados a una relación fuente sumidero. Autores como Eckstein *et al.* (1995); Jullien *et al.* (2001) manifestaron que el balance fuente-sumidero está involucrado en la determinación del peso del racimo, ya que el número de frutos depende del área foliar activa en la inducción floral. Dicha información podría explicar como el T1 y T2 obtuvieron un mayor peso que el T3 al tener un mayor índice de área foliar y así poder llevar a cabo un adecuado proceso de translocación de fotoasimilados. No obstante, fue posible observar como la producción demostró una tendencia al aumento en T3 llegando a estabilizarse en los últimos ciclos de cultivo logrando pesos promedio de 27,8 kg en el sexto ciclo (Figura 1).



**Figura 1.** Pesos de racimo durante seis ciclos de producción en finca comercial de banano (*Musa AAA*), Finca San Pablo, Siquirres, Costa Rica. 2018-2023.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron evidenciar el potencial de los ensilados enriquecidos con microbiota nativa y benéfica como agentes supresores de nematodos y estimulante radical, lo cual evidencia que es posible un manejo integral de los nematodos sin el uso de moléculas nematicidas y sin un detrimento en la producción. Lo anterior abre puertas a estrategias para mitigar y controlar en forma diferenciada uno de los problemas fitosanitarios más limitantes para la producción de banano.

## REFERENCIAS

- Araya M. 2002. Metodología utilizada en el laboratorio de nematología de CORBANA S.A. para la extracción de nematodos de las raíces de banano (*Musa AAA*) y Plátano (*Musa AAB*). CORBANA, 28(55), 97-110.
- Crespo A, Canchignia H, Garcés F. 2023. Nematodes and root system are affected by rhizobacterial consortium in the third generation of commercial banana plants. *Revista de Agricultura Neotropical*, 10(3): 1-6.
- Dita M, Schilly A, Vargas J, Chaves N, Guzman M, Sandoval J, Staver Ch. 2014. Endophyte microbiome of banana roots reveals high diversity and potential of agricultural uses. *In: Tropentag Conference*. September 17-19. Prague-Czech.
- Eckstein K, Robinson J, Davie S. 1995. Physiological Responses of Banana (*Musa AAA*; Cavendish Sub-Group) in the Subtropics. III. Gas Exchange, Growth Analysis and Source-Sink Interaction over a Complete Crop Cycle. *Journal of Horticultural Sciences*. 70: 169–180.
- Gonzalez J, Orlich R, Masis F. 2011. Cultivo de banano en un arreglo especial de siembra en hexágonos: innovación y producción. CORBANA, San José, Costa Rica. 24p.

- Holdridge R. 1978. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Jaramillo J, Vintimilla M, Rubio D, Soto G, Tobar M, Salas E, Araya M. 2019. Effect of nematicide rotation on banana (*Musa* AAA cv. Williams) root nematode control and crop yield. *Agronomía Colombiana*, 37(2): 153-165.
- Jullien A, Munier N, Malézieux E, Chillet M, Ney B. 2001. Effect of pulp cell number and assimilate availability on dry matter accumulation rate in a banana fruit [*Musa* sp. AAA Group ‘Grande Naine’ (Cavendish Subgroup)]. *Annals of Botany* 88: 321–330.
- Lenth R. 2023. *\_emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means\_*. R package version 1.8.8, <<https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>>.
- Moens T, Araya M, Swennen R, Waele D. 2004. Enhanced biodegradation of nematicides after repetitive applications and its effect on root and yield parameters in commercial banana plantations. *Biology and Fertility of Soils*. 39:407-414.
- Pinheiro J, Bates DR Core Team 2023. *\_nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models\_*. R package version 3.1-162, <<https://CRAN.R-project.org/package=nlme>>.
- R Core Team. 2023. *\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- Rapetti M, Dorel M. 2022. Bunch weight determination in relation to the source-sink balance in 12 Cavendish Banana cultivars. *Agronomy* 12 (333): 1-13.
- Sandoval J, Carr C, Guzmán M, González M, Segura R, Guillen C. 2020. Reducción de agroquímicos en el cultivo del banano: investigación; acciones, resultados; conclusiones. *CORBANA*, 46 (66), 143-168.
- Serrano E. 2005. Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica. *In: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management*. Proceedings of an international symposium. INIBAP, Montpellier, France.
- Sikora R, Coyne D, QuénehervéP. 2018. Nematode parasites of bananas and plantains. *In: Sikora, R., Coyne, D., Hallman, J. & Timper, P. (Eds). Plant parasitic nematodes in subtropical agriculture*, 3rd edition. Wallingford, UK, CAB International, pp. 617-657.
- Taylor A, Loegering Q. 1953. Nematodes associated with root lesion in Abaca. *Turrialba*. 3(1-2):8-13
- Torres P. 2014. Principios de estrategias agroecológicas para el combate de enfermedades en hortalizas: estudio de tres sistemas orgánicos en el cantón de Zarcero, Alajuela, Costa Rica. M. Sc. Tesis. UNA. Heredia, Costa Rica. 146p.
- Torres P, Cotes A, Echeverría F, Blanco F, Sandoval J, Segura R, Palomares J. 2023. Ensilaged biostimulants promoting root health and control of *Radopholus similis* in banana (*Musa* AAA) cv. Grande Naine. *European Journal of Plant Pathology* 165, 465–474.
- Torres P, Segura R, Sandoval J, Ortega R, Samuels J. 2019. Manejo de la sanidad radical del cultivo de banano mediante rizoestimulantes microbianos, enmiendas orgánicas y minerales. *CORBANA*, 45 (65), 83-92.
- Ureña H, Madrigal S, Sandoval J, Vega J, Rodríguez A. 2017. Encapsulation of bacterial metabolic infiltrates isolated from different *Bacillus* strains in chitosan nanoparticles as potential green chemistry-based biocontrol agents against *Radopholus similis*. *Journal of Renewable Materials* 5 (3-4): 290-299.

- 
- Vargas R, Wang A, Obregón M, Araya M. 2015. Efecto de *Trichoderma* spp., *Paecilomyces lilacinus* y la inyección de nematicida en el pseudotallo en el combate de *Radopholus similis* y la producción de banano. *Agronomía Costarricense*, 39(2), 61-76.
- Vargas R, Calvo C, Collado M, Araya M. 2006. Evaluation of strategies for the chemical control of nematodes in banana plantations renewed with *in vitro* plants. *CORBANA*, 32, 51–65.
- Vargas R, Araya M. 2018. Contenido de raíces en plantaciones comerciales de banano muestreadas en el intermedio madre-hijo y al frente del hijo de sucesión. *CORBANA*, 44 (64): 97-124.

## Eficacia de *Purpureocillium lilacinum* y *Pochonia chlamydosporia* en el manejo del nemátodo *Radopholus similis* en el cultivo de banano

Natalia E. Molina Quesada<sup>1\*</sup>, Gabriel Solano Maroto<sup>2</sup>, Johenny Solano Maroto<sup>3</sup>, Lizzy Retana Villalobos<sup>4</sup>, Gilberto Masís Solano<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Gerente de RDI y Regulatorio de BioVENKO. <sup>2</sup>Supervisor de Finca Experimental PhytoLab. <sup>3</sup>Directora de PhytoLab. <sup>4</sup>CEO de Biotech CR GRM. <sup>5</sup>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 NE, Solano Maroto G, Solano Maroto J, Retana Villalobos L, Masís Solano G. 2026. Eficacia de *Purpureocillium lilacinum* y *Pochonia chlamydosporia* en el manejo del nemátodo *Radopholus similis* en el cultivo de banano. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 119  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26119>

### RESUMEN

Los nematodos fitoparásitos constituyen la segunda problemática más importante en banano y plátano, después de la Sigatoka negra y amarilla. Este estudio determinó la dosis efectiva de un nematicida microbiológico para el control de *Radopholus similis* en banano (*Musa* AAA cv. Grand Naine). El ensayo se realizó en Limón, Costa Rica, con un diseño de bloques completos al azar y cinco tratamientos: testigo absoluto, testigo inoculado y tres dosis (1, 2 y 3 kg ha<sup>-1</sup>), con cinco réplicas cada uno. Se hicieron cuatro evaluaciones entre 60 y 150 días tras la siembra, midiendo peso de raíz, daño radicular y nematodos. Todas las dosis fueron efectivas, recomendándose 2–3 kg ha<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** Nematicida microbiológico, Dosis efectiva, Manejo sostenible, Control biológico

### ABSTRACT

Phytoparasitic nematodes represent the second most important problem in banana and plantain cultivation, after Black and Yellow sigatoka. This study determined the effective dose of a microbiological nematicide for the control of *Radopholus similis* in banana (*Musa* AAA cv. Grand Naine). The trial was conducted in Limón, Costa Rica, using a randomized complete block design with five treatments: absolute control, inoculated control, and three doses (1, 2, and 3 kg ha<sup>-1</sup>), each with five replicates. Four evaluations were performed between 60 and 150 days after planting, measuring root weight, root damage, and nematode population. All doses were effective, with 2–3 kg ha<sup>-1</sup> recommended.

**Keywords:** Microbiological nematicide, Effective dose, Sustainable Management, Biological control



## INTRODUCCIÓN

El banano es uno de los principales cultivos comerciales a nivel mundial y la fruta de mayor relevancia económica y social en América Latina. En países como Costa Rica, por ejemplo, representa una fuente estratégica de divisas y empleo. Sin embargo, su producción enfrenta desafíos fitosanitarios de gran complejidad: una amplia diversidad de patógenos —hongos, bacterias, virus y plagas— que constituye una amenaza multifacética, con más de 180 enfermedades registradas, al menos diez de ellas responsables de pérdidas significativas en rendimiento y calidad (Zeng *et al.*, 2024).

Dentro de estas problemáticas, los nematodos fitoparásitos constituyen la segunda problemática fitosanitaria más importante en banano y plátano, después de la Sigatoka Negra y Amarilla. Estas plagas ocasionan pérdidas significativas en la producción mundial al dañar raíces y cormos, interfiriendo con la absorción de nutrientes y debilitando el anclaje de las plantas. En particular, el nematodo *R. similis*, endoparásito migratorio del sistema radical, es considerado la principal especie fitoparásita del cultivo por su frecuencia y densidad poblacional. Su impacto ha promovido el uso intensivo de nematicidas en las plantaciones bananeras, lo que incrementa la exposición del suelo y de los ecosistemas circundantes a estos compuestos (Guzmán Piedrahita, 2011; Vu *et al.*, 2006).

El manejo químico, sin embargo, presenta desventajas considerables debido a su toxicidad ambiental y a las crecientes restricciones regulatorias, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles (Rincy *et al.*, 2025). En este contexto, los bionematicidas han cobrado especial relevancia como sustitutos viables de los controles químicos convencionales, al basarse en bacterias y hongos capaces de parasitar, atrapar o inhibir a los nematodos. Entre ellos destacan los hongos nematófagos, que han demostrado eficacia contra diferentes fases del ciclo de vida de estos organismos —como huevos y juveniles— mediante parasitismo, depredación o la producción de metabolitos tóxicos, constituyendo así una herramienta natural y sostenible para reducir el daño en los cultivos y mitigar el impacto ambiental (Sharma *et al.*, 2025).

En esta línea, diversos organismos del suelo han sido identificados como antagonistas de nematodos fitoparásitos, aunque solo una fracción de ellos ha alcanzado desarrollo comercial. Entre estos destaca *Purpureocillium lilacinum*, un hongo de vida libre capaz de parasitar huevos, juveniles y hembras de nematodos, lo que contribuye a disminuir sus poblaciones en el suelo. Cepas seleccionadas de este

microorganismo han sido formuladas y empleadas como bionematicidas en diferentes países (Kepenekci *et al.*, 2018).

De manera análoga, *P. chlamydosporia* var. *chlamydosporia* es un hongo endófito versátil que combina propiedades de biocontrol frente a nematodos fitoparásitos con la capacidad de estimular el crecimiento vegetal. Reconocido principalmente por su parasitismo de huevos de nematodos, este organismo también actúa como endófito benéfico al favorecer la absorción de nutrientes, inducir resistencia sistémica y aumentar la resiliencia de las plantas bajo condiciones de estrés biótico (Rincy *et al.*, 2025).

Bajo el contexto anterior, se planteó la necesidad de evaluar alternativas sostenibles para el manejo de *R. similis* en banano, con el propósito de reducir la dependencia de nematicidas químicos y avanzar hacia prácticas agrícolas más responsables. En este marco, el presente estudio tuvo como objetivo general determinar la dosis efectiva de un nematicida microbiológico formulado a base de *P. lilacinum* y *P. chlamydosporia*, para el control de *R. similis* en el cultivo de banano (*Musa* AAA cv. Grand Naine), aportando evidencia científica que respalde su incorporación en programas de manejo integrado del cultivo.

## 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. La finca recibió manejo comercial uniforme en todos los tratamientos, que incluyó fertilización, deshierba y control de Sigatoka Negra.

### Material biológico

Se emplearon plantas de banano (*Musa* AAA, cv. Grand Naine), obtenidas mediante cultivo de tejidos y previamente aclimatadas en vivero, debido a la susceptibilidad de esta variedad al nematodo *R. similis* (Vargas *et al.*, 2015). Las plantas se establecieron en macetas con capacidad de 12 000 mL<sup>-1</sup>, lo que permitió la inoculación directa del sustrato y el mantenimiento de condiciones semicontroladas en un vivero acondicionado, asegurando mayor eficiencia en la infección y en la evaluación de los tratamientos.

El producto en prueba fue un nematicida microbiológico formulado a base de *P. lilacinum* cepa P-16A ( $8 \times 10^9$  UFC g<sup>-1</sup>) y *P. chlamydosporia* cepa P-21A ( $2 \times 10^9$  UFC

g<sup>-1</sup>). Ambas cepas corresponden a microorganismos nativos del suelo costarricense, reconocidos como agentes de biocontrol frente a nematodos fitoparásitos.

### Diseño experimental

El ensayo de eficacia biológica se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar, con dos factores: tratamiento (cinco niveles) y fecha de evaluación (cuatro niveles). Cada tratamiento incluyó cinco réplicas de tres plantas (15 por evaluación), totalizando 60 plantas por tratamiento y 300 en todo el ensayo (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Descripción de los tratamientos evaluados en el ensayo de eficacia biológica del nematocida microbiológico para el manejo de nematodos en el cultivo de banano.

	Tratamiento	Dosis (kg p.c ha <sup>-1</sup> )*	Dosis (UFC o i.a ha <sup>-1</sup> )**
1	Testigo absoluto	.	.
2	Testigo inoculado	.	.
3	Nematicida microbiológico ( <i>P. lilacinum</i> + <i>P. chlamydosporia</i> )	1,00	1x10 <sup>13</sup>
4		2,00	2x10 <sup>13</sup>
5		3,00	3x10 <sup>13</sup>

\*p.c: producto comercial formulado

\*\*i.a.: ingrediente activo

### Aplicación de tratamientos

Para asegurar la infección por *R. similis*, a los 22 días después de la siembra (dds) se realizó una inoculación mediante un licuado de raíces infectadas. La concentración del inóculo se estandarizó en 50 nematodos mL<sup>-1</sup> y se aplicó de forma uniforme en todas las plantas (10 mL planta<sup>-1</sup>), verificando su efectividad antes de la aplicación de los tratamientos.

Posteriormente, a los 60 dds, se aplicó una sola dosis del nematocida microbiológico mediante drench dirigido a la raíz y rizosfera. La aplicación se efectuó entre los estadios 65 y 78 de la escala fenológica BBCH (Enz y Dachler, 2001), utilizando un volumen equivalente a 160 L ha<sup>-1</sup>, lo que correspondió a 100 mL de mezcla por planta considerando una densidad de 1600 plantas ha<sup>-1</sup>.

### Variables evaluadas

Se realizaron evaluaciones destructivas, en donde se determinó el peso total de raíz, el porcentaje de raíz dañada y el número de nematodos en raíz; para este último, se agruparon tres plantas por réplica en una sola muestra representativa, con

identificación taxonómica y recuento. Las evaluaciones se efectuaron a los 90, 120 y 150 dds, con el fin de analizar el efecto residual del producto durante tres meses.

### **Análisis de datos**

Los datos se analizaron mediante ANOVA, bajo un modelo lineal mixto. Se verificaron los supuestos del análisis con gráficos diagnósticos y en caso de incumplimiento se seleccionó el modelo en función de los criterios AIC y BIC. Cuando se detectaron diferencias significativas, las comparaciones de medias se realizaron con la prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC) ( $p \leq 0,05$ ).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

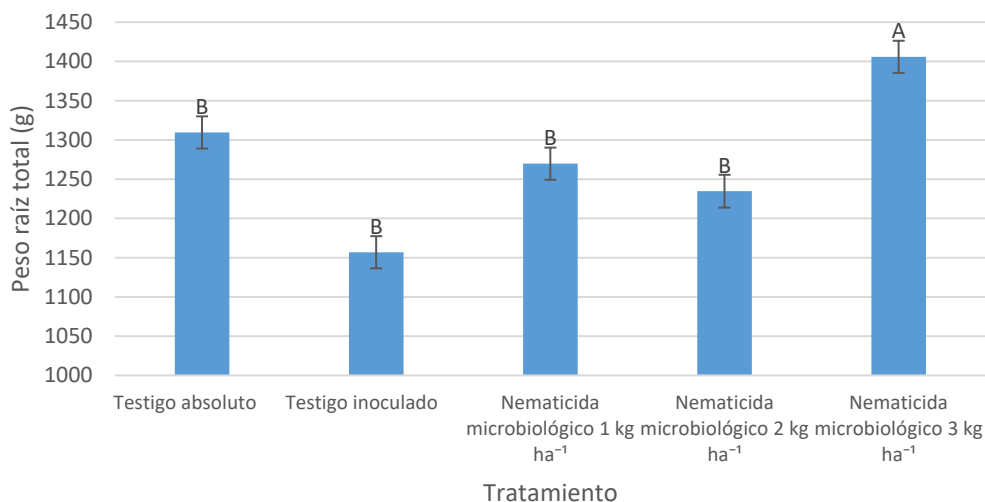
### **Peso total en raíz**

El nematodo *R. similis* ocasiona pérdidas severas de raíces activas en banano al penetrar y destruir tejidos radicales, lo que reduce la absorción de agua y nutrientes y compromete el anclaje de la planta (Ochieno, 2022). En este contexto, el peso total de raíz constituye un indicador indirecto del nivel de daño provocado por el nematodo y, por tanto, de la eficacia del control aplicado.

En el presente estudio, el análisis estadístico mostró diferencias significativas entre tratamientos, fechas de evaluación y su interacción (Cuadro 2). El tratamiento con la dosis más alta del nematicida microbiológico ( $3 \text{ kg ha}^{-1}$ ) presentó el mayor peso promedio de raíz, con un incremento del 21,5 % respecto al testigo inoculado, lo que confirma una reducción sustancial del efecto de *R. similis*. Aunque la dosis baja ( $1 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y media ( $2 \text{ kg ha}^{-1}$ ) no difirieron estadísticamente del testigo inoculado, sí mostraron valores superiores en 9,8 % y 6,7 %, respectivamente, evidenciando una tendencia positiva en la protección del sistema radical (Figura 1).

**Cuadro 2.** Valores de p para los factores del peso total de raíz ( $\alpha=0,05$ ).

<b>Factor</b>	<b>p-valor</b>
Tratamiento	0,0220
Evaluación	<0,0001
Interacción	<0,0001



**Figura 1.** Promedio del peso (g) total de la raíz de banano. Nota: barras con una letra en común son estadísticamente similares. Letras distintas indican diferencia significativa (DGC,  $p \leq 0,05$ ).

Estos hallazgos coinciden con Ahmad *et al.* (2024), quienes destacan que, en condiciones de estrés biótico, el mantenimiento de un sistema radical activo es fundamental para asegurar una absorción eficiente de nutrientes y sostener la productividad del cultivo. El incremento en el peso total de raíz observado en los tratamientos con el nematicida microbiológico confirma este principio, posicionando al producto como una herramienta eficaz dentro de los programas de manejo sostenible de nematodos en banano.

### Porcentaje de raíz dañada

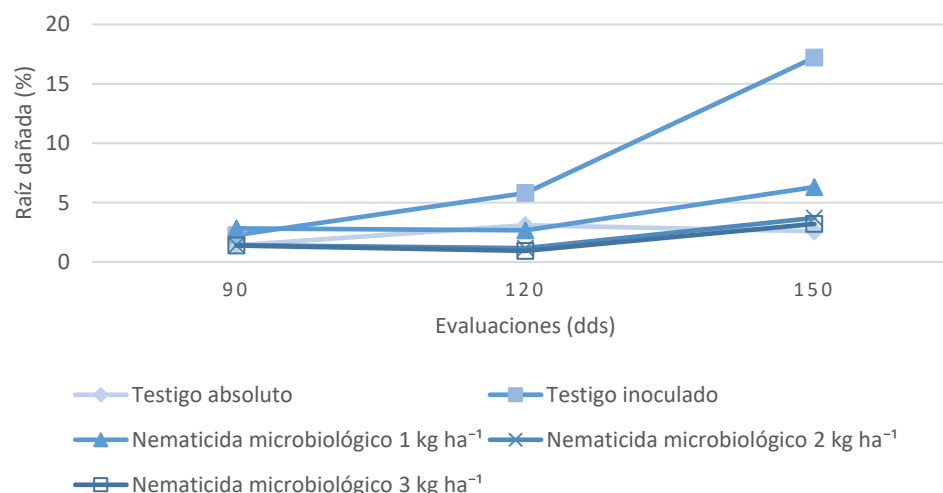
El daño en las raíces es uno de los principales indicadores de la severidad de infestación por *R. similis*, ya que este nematodo provoca necrosis y pérdida de tejido radical, lo que repercute directamente en la absorción de agua y nutrientes, así como en la estabilidad de la planta (Ochieno, 2022). Por ello, evaluar el porcentaje de raíz dañada permite medir con precisión la efectividad de un nematicida al reducir los efectos directos del patógeno sobre el sistema radical.

El porcentaje de raíz dañada mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, fechas de evaluación y su interacción (Cuadro 3). El testigo inoculado evidenció un incremento progresivo en el daño radicular, alcanzando hasta un 17,2 % en la última evaluación, lo que confirmó la efectividad de la inoculación con *R. similis*. En contraste, los tratamientos con el nematicida microbiológico redujeron el daño de

manera consistente: las dosis de 2 y 3 kg ha<sup>-1</sup> mostraron diferencias significativas frente al testigo inoculado, con valores por debajo del 5 % de raíces afectadas en promedio. La dosis de 1 kg ha<sup>-1</sup>, aunque presentó menores daños que el testigo, no difirió estadísticamente de este.

**Cuadro 3.** Valores de p para los factores del porcentaje de raíz dañada ( $\alpha=0,05$ )

Factor	p-valor
Tratamiento	0,0012
Evaluación	0,0005
Interacción	0,0009



**Figura 2.** Comportamiento del porcentaje de raíz dañada durante el ensayo.

Los resultados confirman que la aplicación del nematicida microbiológico redujo significativamente el daño ocasionado por *R. similis*, especialmente en las dosis de 2 y 3 kg ha<sup>-1</sup>, que mostraron un efecto protector claro frente al testigo inoculado. Esta respuesta coincide con lo señalado por Ahmad *et al.* (2024), quienes resaltan que mantener la integridad del sistema radical es clave para garantizar la funcionalidad del cultivo bajo condiciones de estrés. En este sentido, la reducción en el porcentaje de raíz dañada refuerza la utilidad del nematicida como una alternativa sostenible para el control de nematodos en banano.

### Nematodos totales

El monitoreo de las poblaciones de *R. similis* en raíces constituye un indicador directo de la presión del nematodo sobre el cultivo y de la eficacia del manejo aplicado.

Este patógeno es uno de los más dañinos en banano a nivel mundial, ya que interfiere en la absorción de nutrientes y genera pérdidas significativas en rendimiento y calidad del fruto (Ochieno, 2022).

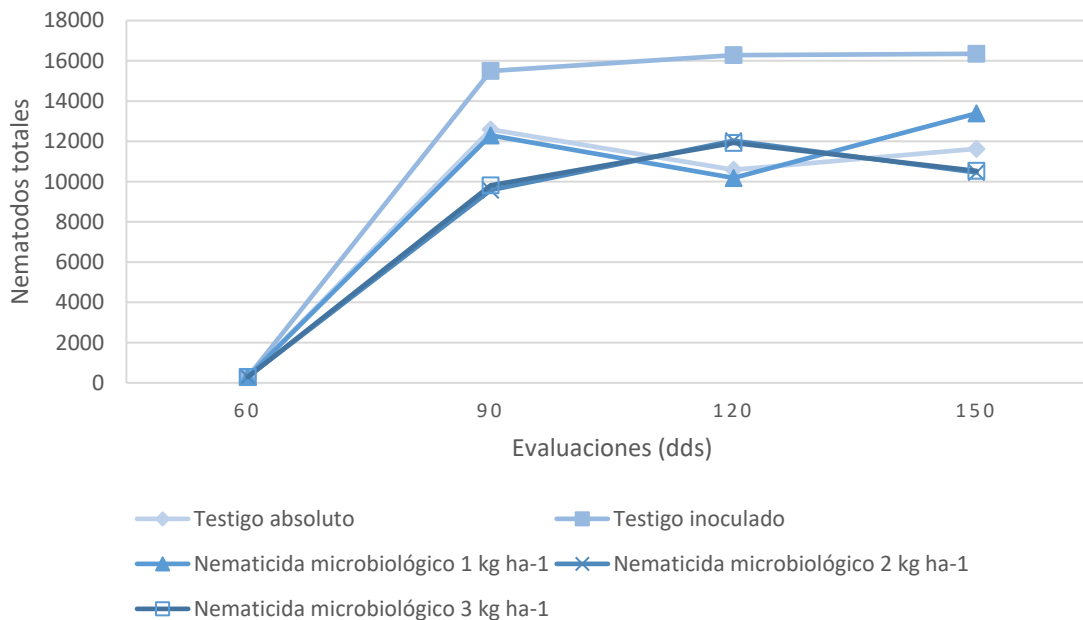
En este estudio, la evaluación de las poblaciones de *R. similis* mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, fechas de evaluación y la interacción de ambos factores (Cuadro 4). Tal como se aprecia en la Figura 3, el testigo inoculado presentó los conteos más altos de nematodos en todas las evaluaciones, diferenciándose claramente del resto a partir de los 90 días después de siembra. Estos resultados confirman que la inoculación con el patógeno fue efectiva y que el nematocida microbiológico ejerció un efecto de control.

**Cuadro 4.** Valores de p para los factores de la cantidad total de nematodos en las raíces de banano.

Factor	p-valor
Tratamiento	0,0016
Evaluación	<0,0001
Interacción	0,0280

Entre los tratamientos con el nematocida microbiológico, las dosis de 2 y 3 kg ha<sup>-1</sup> redujeron significativamente las poblaciones de *R. similis*, evidenciando un control progresivo y estable a lo largo del ensayo. La dosis de 1 kg ha<sup>-1</sup> mostró un comportamiento intermedio, sin diferir estadísticamente del testigo inoculado en todas las evaluaciones. Este patrón explica los valores de significancia observados en el Cuadro 4, donde tanto el tratamiento como la interacción con el tiempo influyeron de manera importante en los conteos de nematodos. Cabe señalar que el testigo absoluto, aunque no fue inoculado, presentó niveles naturales de *R. similis* propios del suelo de la finca. En este sentido, las dosis más altas del nematocida microbiológico lograron reducir las poblaciones del patógeno hasta valores cercanos a esos niveles basales, indicando una disminución efectiva de la presión del inóculo en las plantas tratadas.

En conjunto, estos resultados evidencian que la aplicación del nematocida microbiológico redujo de manera consistente las poblaciones de *R. similis* en el sistema radical del banano, confirmando su potencial para limitar la proliferación del nematodo y consolidándose como una herramienta eficaz dentro de los programas de manejo sostenible del cultivo.



**Figura 3.** Comportamiento de la cantidad total de nematodos en las raíces de las plantas de banano durante el ensayo.

## CONCLUSIONES

El nematicida microbiológico demostró eficacia en el control de *R. similis* en banano (*Musa* AAA cv. Grand Naine), al reducir significativamente el daño radicular y las poblaciones del nematodo en comparación con el testigo inoculado. Estos resultados confirman su potencial como herramienta de manejo sostenible frente a esta plaga de alta importancia económica.

Las dosis de 2 y 3 kg ha<sup>-1</sup> fueron las más efectivas, ya que contribuyeron a mantener un sistema radical más sano y con mayor biomasa, condición esencial para la absorción de nutrientes y la tolerancia al estrés. De esta forma, el producto se posiciona como una alternativa viable a los nematicidas químicos, favoreciendo la sostenibilidad en la producción bananera.

Se recomienda dar continuidad a la investigación mediante la evaluación del impacto de los tratamientos sobre variables de rendimiento, considerando que los biocontroladores aplicados mostraron un efecto bioestimulante reflejado en el incremento de la biomasa radicular total.

## REFERENCIAS

- Ahmad B, Jamil A, Shahwar D, Siddique A and Syed U. 2024. Plant biochemistry and yield in response to biostimulants—ScienceDirect. En *Biostimulants in Plant Protection and Performance* (pp. 205-219). Elsevier. <https://sciedirect.proxyucr.elogim.com/science/article/pii/B9780443158841000051>
- Brühl CA, Arias Andres M, Echeverría-Sánchez S, Bundschuh M, Knäbel A, Mena F, Petschick LL, Ruepert C, and Stehle S. 2023. Pesticide use in banana plantations in Costa Rica – A review of environmental and human exposure, effects and potential risks. *Environment International*, 174, 107877. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107877>
- Guzmán Piedrahita ÓA. 2011. El nematodo barrenador (*Radopholus similis* [Cobb] Thorne) del banano y plátano. 33. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-24742011000200012](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742011000200012)
- Kepekci I, Hazir S, Oksal E and Lewis E. 2018. Application methods of *Steinernema feltiae*, *Xenorhabdus bovienii* and *Purpureocillium lilacinum* to control root-knot nematodes in greenhouse tomato systems. *Crop Protection* 108, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.02.009>
- Ochieno DMW. 2022. Comparative effects of nitrogen, phosphorus and potassium on *Radopholus similis* infection in East African highland banana plants as influenced by rhizosphere biota. *Scientific African* 17, e01320. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01320>
- Rincy M, Fayad MA, Charles S, Praveena R and Eapen S. 2025. The fungal endophyte *Pochonia chlamydosporia* boosts growth and defence in black pepper (*Piper nigrum* L.): Insights from transcriptomics and functional studies. *Rhizosphere*, 35, 101139. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101139>
- Sharma M, Devi S and Chand S. 2025. Biocontrol strategies for sustainable management of root-knot nematodes. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 136, 102548. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102548>
- Vu T, Hauschild R and Sikora RA. 2006. *Fusarium oxysporum* endophytes induced systemic resistance against *Radopholus similis* on banana. 8(6), 847-852. <https://doi.org/10.1163/156854106779799259>
- Zeng H, Wu Y, Xu L, Dong J and Huang. 2024. Banana defense response against pathogens: Breeding disease-resistant cultivars. *Horticultural Plant Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2024.08.004>

# Tecnología innovadora para el control de las poblaciones de nematodos fitopatógenos en el cultivo de banano (*Musa paradisiaca* L.)

Marcell Maldonado Lucio<sup>1\*</sup>, Mairett Yuri Rodríguez-Balza<sup>2</sup>, Jesús Eduardo Caripe Galindo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jefe técnico Banano, <sup>2</sup>Jefe de Bioestadística, <sup>3</sup>Gerente técnico, Mercadeo y Desarrollo, Interoc Ecuador

\*Autor de correspondencia:  
Marcell Maldonado Lucio  
marcell.maldonado@interoc.biz

Contribución:  
Artículo Científico

Sección:  
Fitosanidad

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

Cita:  
Maldonado Lucio M,  
Rodríguez-Balza MY, Caripe  
Galindo JE. 2026. Tecnología  
innovadora para el control de  
las poblaciones de nematodos  
fitopatógenos en el cultivo de  
banano (*Musa paradisiaca* L.).  
*Acorbat Revista de Tecnología  
y Ciencia* 3(1): 120  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26120>

## RESUMEN

En Ecuador, el cultivo de banano se desarrolla en diversas zonas con condiciones climáticas y edáficas variables, las cuales influyen directamente en el rendimiento y en la incidencia de plagas. Entre ellas, la sigatoka negra es considerada la principal enfermedad foliar, seguida por los nematodos fitopatógenos, organismos microscópicos que afectan el sistema radicular del cultivo. La dinámica poblacional de estos nematodos depende en gran medida del clima y del manejo del suelo. La empresa INTEROC ha desarrollado, durante varios años, ensayos orientados en identificar alternativas al control químico convencional, buscando opciones más selectivas y de menor impacto ambiental. Se realizaron más de 30 ensayos comerciales en distintas zonas bananeras del país utilizando el producto ABASPIRAT, observándose un efecto de control igual o superior sobre las poblaciones de los cuatro géneros de nematodos que afectan la sanidad radicular del banano, en comparación con nematicidas sintéticos disponibles en el mercado. ABASPIRAT es una formulación compuesta por abamectina y spirotetramat, cuya sinergia confiere un control residual sobre las poblaciones de nematodos de hasta 90 días después de su aplicación. El producto mantiene reducidas las poblaciones de nematodos fitopatógenos, destacándose como una tecnología innovadora y de menor riesgo tanto para los aplicadores como para el medio ambiente en las áreas tratadas.

**Palabras clave:** Nematicida, Fitopatógenos, Abamectina, Spirotetramat, Grandes parcelas sin repetición

## ABSTRACT

In Ecuador, banana cultivation takes place in diverse areas with variable climatic and soil conditions, which directly influence yield and pest incidence. Among these, black sigatoka is considered the main foliar disease, followed by plant-pathogenic nematodes, microscopic organisms that affect the crop's root system. The population dynamics of these nematodes depend largely on climate and soil management. For several years, INTEROC has conducted trials aimed at identifying alternatives to conventional chemical control, seeking more selective options with a lower environmental impact. More than 30 commercial trials were conducted in different banana-growing areas of the country using the product ABASPIRAT, observing an equal or superior control effect on the populations of the four genera of nematodes that affect banana root health, compared to commercially available synthetic nematicides. ABASPIRAT is a formulation composed of abamectin and spirotetramat, whose synergy provides residual control of nematode populations for up to 90 days after application. The product keeps plant pathogenic nematode populations low, standing out as an innovative technology with lower risk for both applicators and the environment in treated areas.

**Keywords:** Nematicide, Plant pathogens, Abamectin, Spirotetramat, Large plots without repetition



## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Maldonado, Rodríguez-Balza y Caripe (2024), la superficie destinada al cultivo de banano en Ecuador alcanza aproximadamente 170.000 hectáreas, lo que representa alrededor del 35 % del PIB agrícola nacional, con presencia comercial en todos los continentes. Sin embargo, se estima que solo unas 40.000 hectáreas reciben tratamiento nematicida mediante productos de síntesis química, a pesar del elevado impacto que estos organismos tienen sobre la productividad (Maldonado, Rodríguez-Balza y Caripe, 2025).

Los nematodos fitopatógenos constituyen una de las principales plagas del cultivo de banano. Según Espinoza (2017), las especies más destructivas son los endoparásitos migratorios *Radopholus similis* y *Pratylenchus coffeae*, el semiendoparásito *Helicotylenchus multicinctus* y, en menor proporción, los endoparásitos sedentarios del género *Meloidogyne* spp., ampliamente distribuidos en las zonas bananeras del país.

El método más común para su manejo es el control químico, mediante productos de amplio espectro que, aunque efectivos, pueden alterar el equilibrio biológico del suelo y afectar organismos benéficos. En este contexto, INTEROC S.A. desarrolló el formulado ABASPIRAT en el año 2018, iniciando pruebas exploratorias en laboratorio, seguidas de ensayos en macetas bajo condiciones controladas y posteriormente en campo. Una vez registrado el producto (2023), se iniciaron los ensayos semicomerciales en diferentes localidades del Ecuador con el objetivo de evaluar su desempeño bajo distintas condiciones ambientales y tipos de suelo, buscando mejorar la sanidad radicular y promover un sistema de producción más sostenible.

ABASPIRAT es un nematicida de síntesis química selectiva, que combina abamectina y spirotetramat. La interacción entre ambos ingredientes activos genera un efecto sinérgico con control residual de hasta 90 días. La inclusión de spirotetramat, un pro-insecticida/nematicida con bajo impacto sobre insectos benéficos y menor riesgo para los aplicadores, permite reducir la carga química del manejo fitosanitario y ofrecer un control eficaz y sostenible de los nematodos fitopatógenos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se basó en más de 30 ensayos semicomerciales realizados en todas las zonas bananeras, que comprenden las provincias de Los Ríos, Guayas y El Oro.

En Los Ríos, la zona norte (Quevedo, Buena Fe y Valencia) presenta una pluviometría promedio de 3000 mm/años distribuidos en siete meses, con humedad relativa superior al 90 %. En la zona sur (Ventanas, Pueblo Viejo y Baba), la pluviometría promedio es de 2000 mm/años concentrados en cinco meses, con humedad relativa que puede descender por debajo del 80 %. En Guayas, (Milagro, Simón Bolívar, El Triunfo, Marcelino Maridueña, Naranjito, Bucay y Naranjal) la pluviometría promedio es de 2000 mm/año y humedad relativa variable. Finalmente, El Oro presenta condiciones más secas, con 600 mm/año de lluvia en cuatro meses y humedad relativa superior al 90 % durante ese período (CISPDR, 2016; Moncayo, Segarra y Haro, 2009).

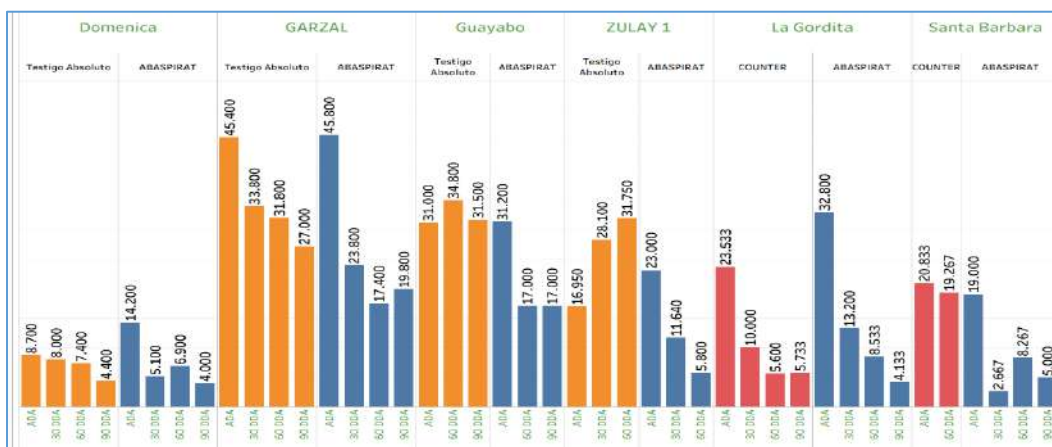
Los ensayos se realizaron bajo el modelo GPSR – Grandes Parcelas Sin Repetición (Machado, 2000). Cada tratamiento se aplicó en parcelas de 5 ha, con cuatro unidades de muestreo (u.m.) por tratamiento, y cinco plantas por u.m. Las evaluaciones se realizaron en cuatro momentos: 10 días antes de la aplicación (ADA), 30, 60 y 90 días después de la aplicación (DDA).

Se comparó ABASPIRAT con un testigo absoluto (sin tratamiento) y, en algunos casos, con un testigo comercial (Counter, terbufos). Las muestras de raíces fueron analizadas en laboratorio para determinar la población total de nematodos por género y el peso de raíces vivas (g/planta), como indicador de sanidad radicular.

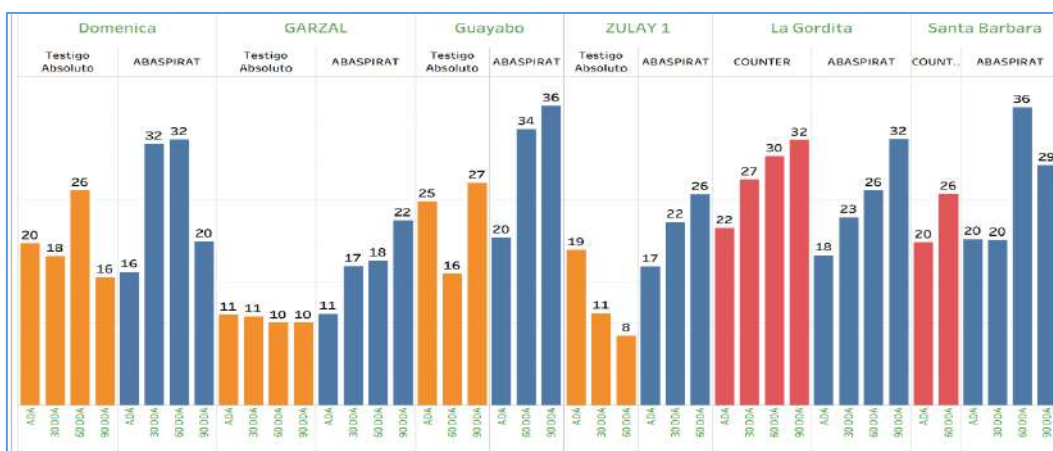
## **RESULTADOS Y DISCUSION**

Los resultados de laboratorio reflejan la suma total de los cuatro géneros de nematodos en cada período de evaluación, así como el peso promedio de raíces vivas por planta.

En la zona norte de Los Ríos, la población total de nematodos disminuyó progresivamente con ABASPIRAT hasta los 90 DDA, mostrando consistentemente valores inferiores a los testigos (Figura 1). Asimismo, el peso de raíces vivas (g/planta) aumentó de forma significativa, reflejando mejor sanidad radicular (Figura 2).



**Figura 1.** Población total de nematodos en la Zona Norte provincia de Los Ríos, en cada momento de evaluación por tratamiento.

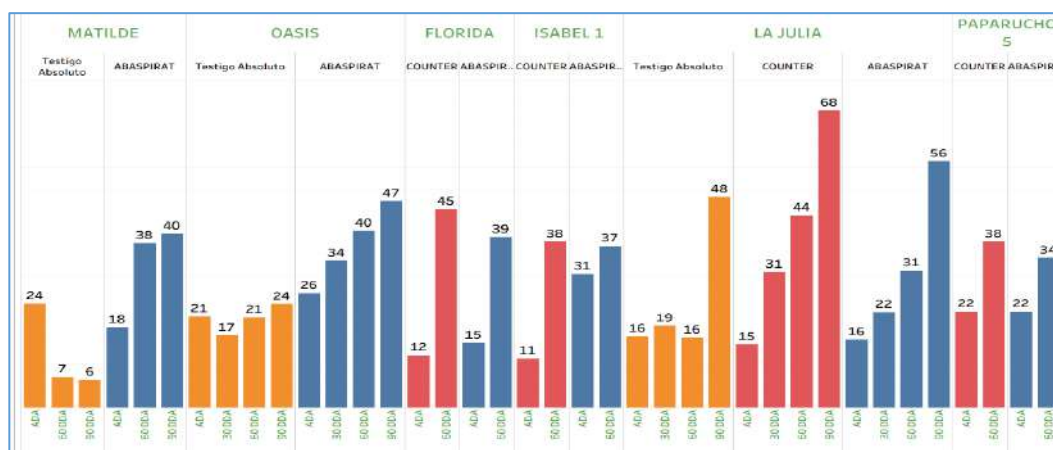


**Figura 2.** Peso de raíces vivas en gramos por planta en la Zona Norte provincia de Los Ríos, en cada momento de evaluación por tratamiento.

En la zona sur de Los Ríos (Figuras 3 y 4), se observó una reducción de las poblaciones de nematodos y un aumento del peso radicular en las fincas Matilde, Oasis e Isabel 1, en comparación con el testigo absoluto. En las fincas Florida y Paparucho, ABASPIRAT mostró valores similares al testigo comercial (Counter).

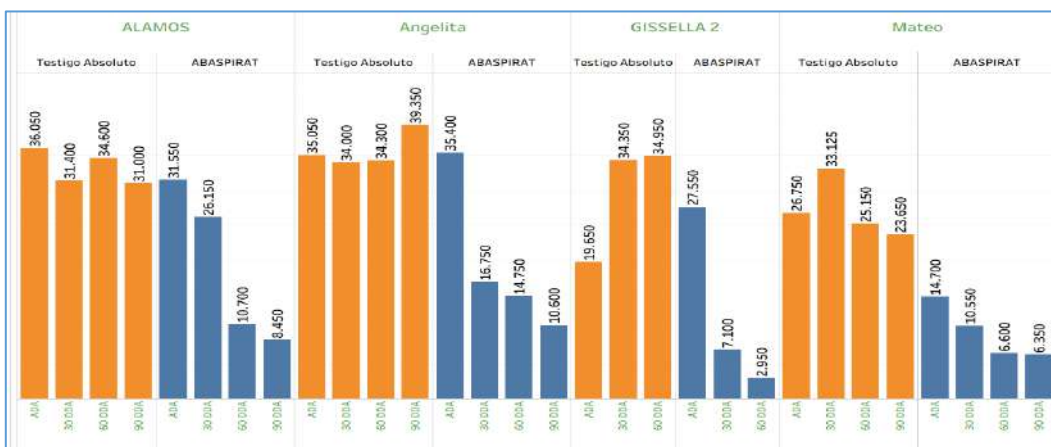


**Figura 3.** Población total de nematodos en la Zona Sur provincia de Los Ríos, en cada momento de evaluación por tratamiento.

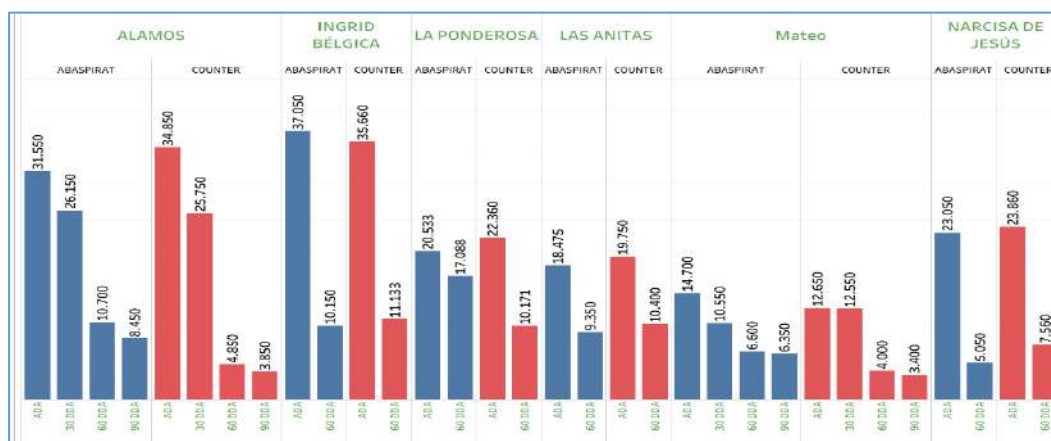


**Figura 4.** Peso de raíces vivas en gramos por planta en la Zona Sur provincia de Los Ríos, en cada momento de evaluación por tratamiento.

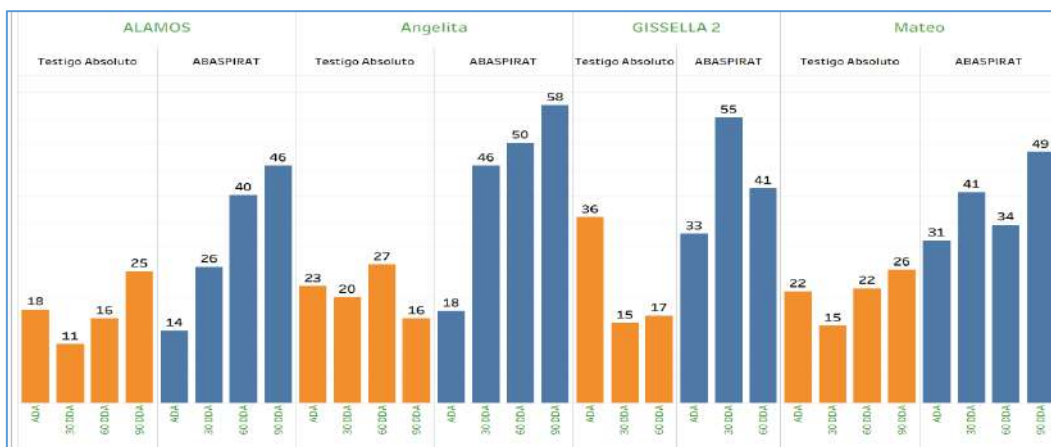
En la provincia del Guayas (Figuras 5, 6, 7 y 8), la aplicación de ABASPIRAT produjo una importante reducción poblacional en todos los sitios evaluados, similar o superior al tratamiento con Counter. El peso de raíces vivas fue consistentemente mayor que el del testigo absoluto.



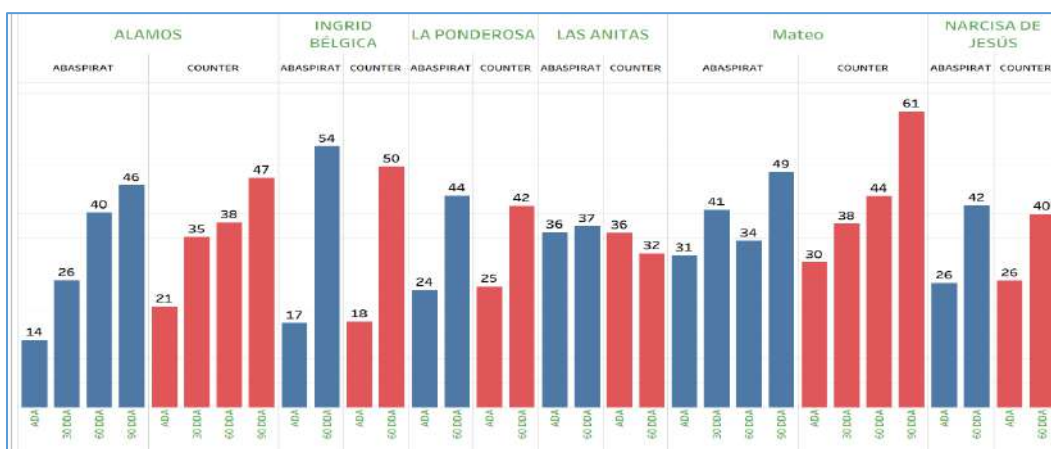
**Figura 5.** Población total de nematodos en la Zona provincia Guayas, en cada momento de evaluación por tratamiento.



**Figura 6.** Población total de nematodos en la Zona provincia Guayas, en cada momento de evaluación por tratamiento.

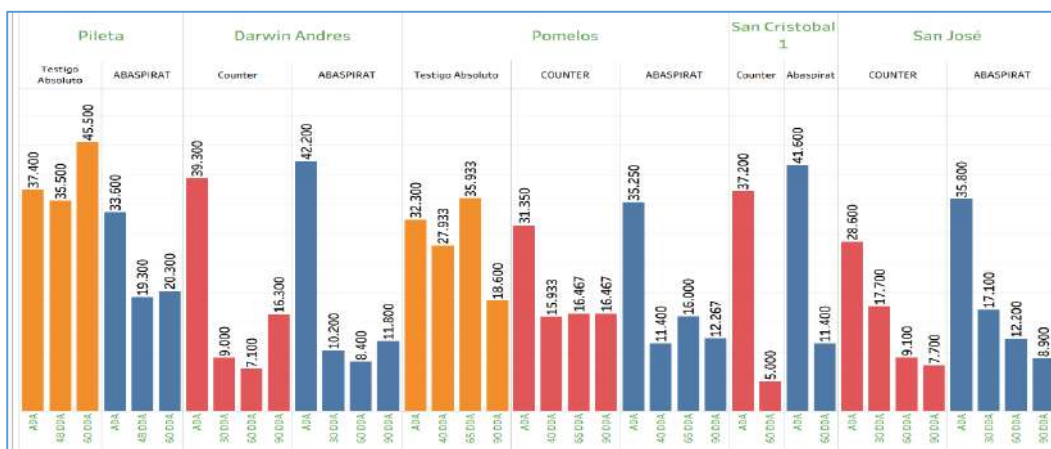


**Figura 7.** Peso de raíces vivas en gramos por planta en la Zona provincia Guayas, en cada momento de evaluación por tratamiento.

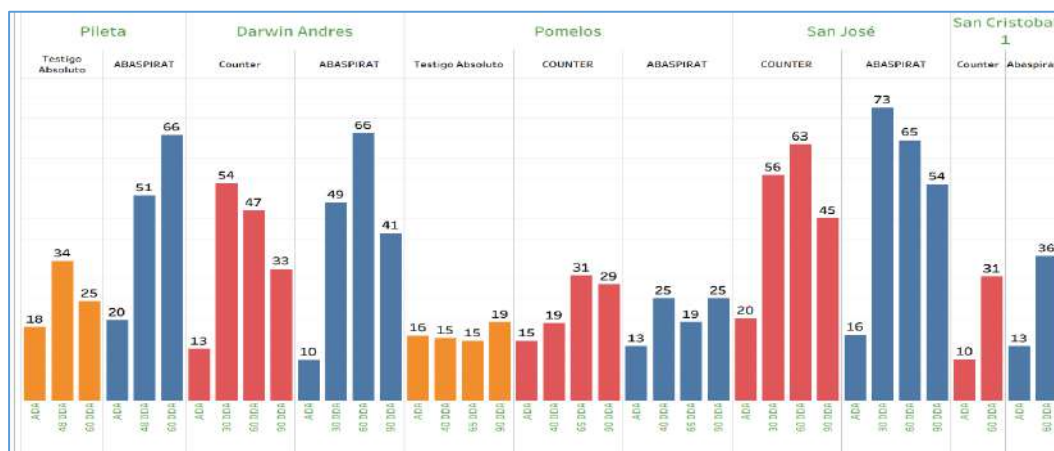


**Figura 8.** Peso de raíces vivas en gramos por planta en la Zona provincia Guayas, en cada momento de evaluación por tratamiento.

En El Oro, ABASPIRAT redujo significativamente las poblaciones totales de nematodos respecto al testigo absoluto y presentó resultados equivalentes o superiores al testigo comercial, con incrementos notables en el peso radicular.



**Figura 9.** Población total de nematodos en la Zona provincia El Oro, en cada momento de evaluación por tratamiento.



**Figura 10.** Peso de raíces vivas en gramos por planta en la Zona provincia El Oro, en cada momento de evaluación para cada tratamiento.

En general, los resultados demuestran que ABASPIRAT, la nueva tecnología desarrollada por INTEROC, mantiene un control efectivo y prolongado (hasta los 90 DDA) sobre las poblaciones de los cuatro géneros de nematodos, expresados en la población total, promoviendo una mejor sanidad al obtenerse en general mayor peso de raíces vivas (g) por planta respecto a los testigos absolutos y similar o superior en algunos ensayos al testigo comercial Counter, un químico de amplio espectro. ABASPIRAT es un nematocida selectivo con menor impacto ambiental. Los nematodos causan deterioro del sistema radicular, retraso en el crecimiento de la planta, disminución del rendimiento y reducción de la calidad del fruto (Acosta, 2021; Medina, 2022). Espinoza (2017) reporta pérdidas de hasta un 22 % asociadas a su incidencia.

Se recomienda aplicar tratamientos nematicidas cuando la población supera los 10.000 individuos por cada 100 g de raíces.

El formulado ABASPIRAT desarrollado por INTEROC, es un producto más selectivo por no tener presión de vapor en ninguno de sus activos (Abamectina y Spirotetramat) que afecte a microorganismos e insectos benéficos.

## CONCLUSIONES

El formulado ABASPIRAT mostró un desempeño consistente en diferentes condiciones ambientales y tipos de suelo donde se cultiva banano en Ecuador.

Controló las poblaciones de nematodos de manera similar o superior al testigo comercial (Counter), con una menor carga química, lo que implica menor impacto ambiental.

Se observó un aumento significativo del peso de raíces vivas (g/planta), indicador de mejor sanidad radicular y, por ende, mayor potencial productivo.

En ausencia de control, los testigos absolutos mantuvieron poblaciones elevadas de nematodos y bajo peso radicular, confirmando la necesidad de manejo nematicida en el cultivo.

ABASPIRAT constituye una tecnología innovadora y selectiva para el manejo sostenible de nematodos en el cultivo de banano en Ecuador.

## REFERENCIAS

- Acosta Mauricio J. 2021. Efecto de dos nematicidas para el control de nemátodos en dos variedades de banano: Cavendish y Gran Enano. Trabajo de grado. Universidad Agraria del Ecuador, Ecuador. 56 p.
- Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research. 2016. Plan Nacional de la gestión integrada e integral de los recursos hídricos de las cuencas y microcuencas hidrográficas de Ecuador. 602 p.
- Espinoza A. 2017. Extractos botánicos con potencial aplicación en el control de nemátodos en el cultivo de banano. Tesis de grado. Universidad Técnica de Machala, El Oro, Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/11345>
- Ferji Z, Mayad El H, Alfalah M. 2013. Management of root knot nematode affecting banana crop by using organic amendment and biological products. Journal of Biology, Agriculture and Healthcare, ISSN 2224-3208 (Paper) ISSN 2225-093X (Online) 3:17.
- Machado W. 2000. Planificación y análisis de experimentos de campo en grandes parcelas sin repetición. Universidad Central de Venezuela, Alcance 59. 81 p.
- Maldonado LM, Rodríguez-Balza MY y Caripe GJE. 2024. *Bacillus methylotrophicus* en la sanidad radicular del cultivo de banano (*Musa paradisiaca*). Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia 1(1): 62 <https://doi.org/10.62498/ARTC.2462>

- 
- Maldonado LM, Rodríguez-Balza MY y Caripe GJE. 2025. New tool for controlling plant pathogenic nematode populations in banana crops (*Musa paradisiaca* L.) and its impact on productivity. ONTA Colombia 2025 Book abstract for Nematology without Borders Integrating Science and Innovation for the Agriculture of the Future. Cali, Colombia. p. 53
- Medina R. 2022. Manejo integrado del nematodo (*Radopholus similis*) en el cultivo de banano (*Musa* AAA). Trabajo de grado. Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador. 19 p.
- Moncayo P, Segarra G, Haro, R 2009. Generación de geoinformación para la gestión del territorio y valoración de tierras rurales de la cuenca del Rio Guayas escala 1:25.000. 26 p.

# Vectorialidad del picudo negro (*Cosmopolites sordidus*) en la transmisión de *Ralstonia solanacearum* raza 2 en banano Cavendish (*Musa AAA*)

Keilor J. Delgado G<sup>1\*</sup>, César Guillén S<sup>2</sup>, Eduardo Granados B<sup>2</sup>, Ana Tapia F<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Investigador independiente, <sup>2</sup>Universidad de Costa Rica, Sede del Atlántico, <sup>3</sup>Investigadora independiente

**\*Autor de correspondencia:**

Keilor Delgado Gamboa  
keilordelgado@gmail.com

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**

Delgado Gamboa K, Guillén C, Granados E, Tapia A. 2026. Vectorialidad del picudo negro (*Cosmopolites sordidus*) en la transmisión de *Ralstonia solanacearum* raza 2 en banano Cavendish (*Musa AAA*). 2026. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 121 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26121>

## RESUMEN

Los productores de banano enfrentan desafíos que comprometen su productividad, entre ellos la enfermedad conocida como el Moko, causado por *Ralstonia solanacearum* raza 2, y el picudo negro (*Cosmopolites sordidus*), la plaga de cormo más importante del cultivo. Aunque su daño directo es conocido, no existía evidencia sobre su papel como vector de la bacteria. Esta investigación, realizada en Turrialba, Costa Rica, evaluó la capacidad de *C. sordidus* para adquirir *R. solanacearum* interna y externamente, así como su transmisión a plantas sanas por mecanismos activos y pasivos. Los resultados demostraron que el insecto puede adquirir *R. solanacearum* tanto externa como interna, y que actúa como vector del patógeno, capaz de infectar mediante un mecanismo activo y asociado a la presencia de plantas asintomáticas de Moko.

**Palabras clave:** Vector, Epidemiología, Adquisición de patógenos, Mecanismos de infección

## ABSTRACT

Banana producers face several challenges that compromise productivity, including the disease known as Moko, caused by *Ralstonia solanacearum* race 2, and the banana weevil (*Cosmopolites sordidus*), the most important corm pest of the crop. Although the direct damage caused by this insect is well known, there was previously no evidence of its role as a vector of the bacterium. This study, conducted in Turrialba, Costa Rica, evaluated the ability of *C. sordidus* to acquire *R. solanacearum* both externally and internally, as well as its transmission to healthy plants through active and passive mechanisms. The results demonstrated that the insect can acquire *R. solanacearum* both externally and internally and acts as a vector of the pathogen, capable of infecting plants through an active mechanism associated with the presence of asymptomatic Moko-infected plants.

**Keywords:** Vector, Epidemiology, Pathogen Acquisition, Infection Mechanisms



## INTRODUCCIÓN

Los productores de banano enfrentan importantes desafíos fitosanitarios que afectan la productividad del cultivo, destacando la enfermedad del Moko, causada por *Ralstonia solanacearum* raza 2, y el picudo negro (*Cosmopolites sordidus*). El Moko representa una de las enfermedades de mayor impacto económico a nivel nacional e internacional, ya que afecta todos los órganos de la planta (Montero, 2020), mientras que el picudo negro es la principal plaga insectil del cormo, cuyo daño reduce la absorción de agua y nutrientes, disminuye la productividad y provoca el volcamiento de las plantas (Amador *et al.*, 2015; Vargas *et al.*, 2017). A pesar del daño que ocasiona esta plaga, existe poca literatura que señale el potencial de *C. sordidus* como vector, específicamente, para el caso de *Ralstonia solanacearum* raza 2.

El objetivo de la investigación fue demostrar la función que desempeña el picudo negro *C. sordidus* en la epidemiología de la bacteria *R. solanacearum* raza 2, agente causal del Moko en el cultivo de banano del subgrupo Cavendish (*Musa* AAA).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la Universidad de Costa Rica, Sede del Atlántico, Recinto de Turrialba, Cartago, Costa Rica, en las coordenadas geográficas 9°54'05"N 83°40'18"O, a 616 msnm, bajo condiciones de temperatura que oscilaron entre 20 °C y 28 °C, con un promedio de 23 °C.

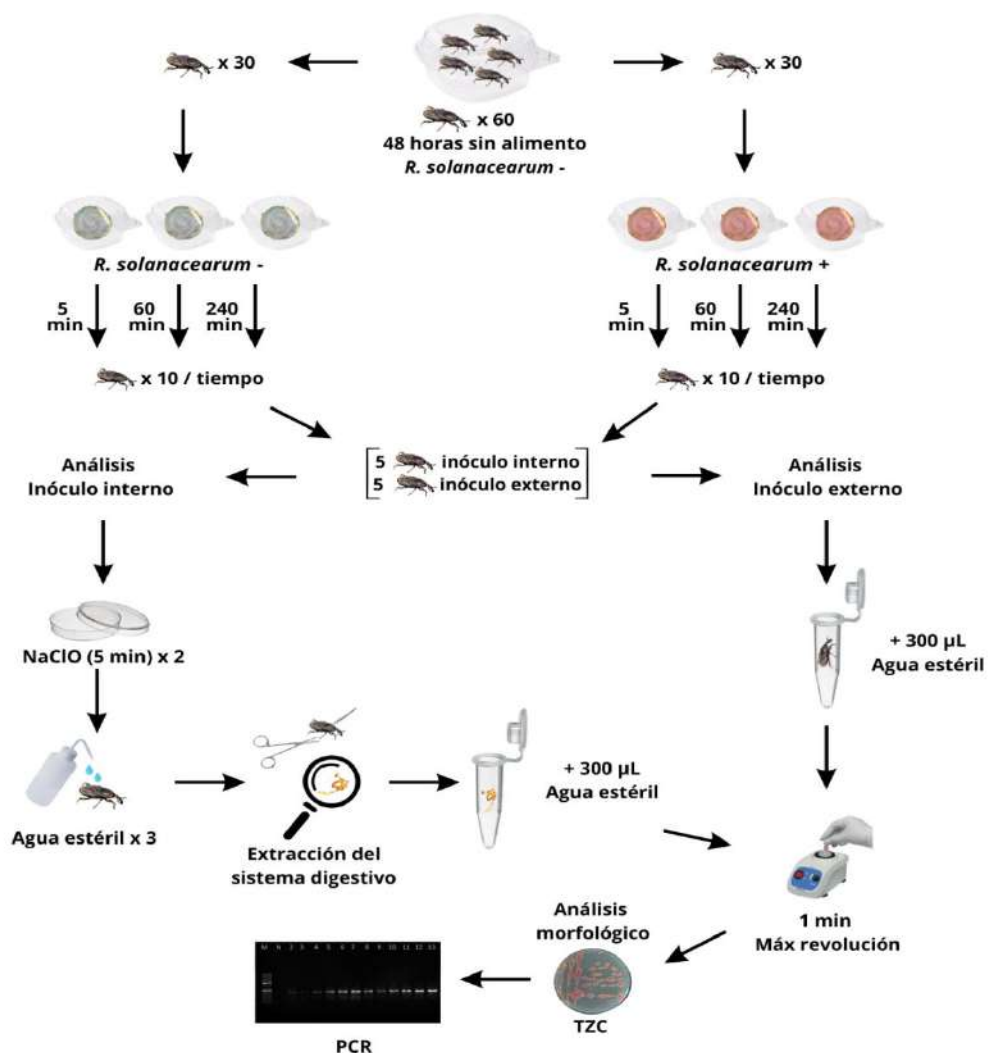
### Material Experimental

Los insectos se recolectaron en una plantación de banano de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agrocológicos (FEIMA), y para ello se colocaron trampas con feromona (COSMOLURE +1). El inóculo de la bacteria se recolectó de plantas sintomáticas de Moko de una finca bananera de la zona del Caribe de Costa Rica.

### Adquisición externa e interna de *R. solanacearum* raza 2 por *C. sordidus*

Se midió el tiempo necesario que *C. sordidus* requiere para adquirir *R. solanacearum* raza 2 tanto externa como internamente cuando el insecto entra en contacto con tejido vegetal de banano infectado por la bacteria. Para ello, se aislaron 60 individuos de *C. sordidus* libres de *R. solanacearum* raza 2, los cuales se colocaron en una caja plástica por 48 h y sin alimentación. Transcurrido este tiempo, se colocaron 30 individuos en cajas plásticas de 252 cm<sup>3</sup>, con un trozo de 10 g de tejido vegetal de banano recolectado de plantas de banano Cavendish (*Musa* AAA) sin presencia de *R. solanacearum* raza 2. Una vez transcurridos los primeros 5 min de contacto y alimentación de los insectos, se retiraron 10 individuos y se aislaron en platos de Petri

para el análisis externo e interno. Posteriormente, se retiraron 10 individuos a los 60 y 240 min utilizando la misma metodología. Paralelamente, se desarrolló un segundo experimento utilizando como fuente de alimento tejido infectado con *R. solanacearum* raza 2, siguiendo el mismo esquema de trabajo previamente descrito (Figura 1).



**Figura 1.** Evaluación del inóculo externo e interno de *R. solanacearum* raza 2 en *C. sordidus*.

### Análisis molecular de colonias de *R. solanacearum* raza 2

Las colonias compatibles con *R. solanacearum* raza 2 se identificaron por técnicas moleculares de PCR, empleando la metodología descrita por Monge (2015), el cual utilizó para su reconocimiento general los iniciadores de 759 (5' - GTC GCC

GTC AAC TCA CTT TCC - 3') y 760 (5' - GTC GCC GTC AGC AAT GCG GAA TCG - 3'); para el reconocimiento de los filotipos los iniciadores Nmult21:1F (5' CGT TGA TGA GGC GCG CAA TTT 3'), Nmult21:2F (5' - AAG TTA TGG ACG GTG GAA GTC - 3'), Nmult23:AF (5' - ATT ACS AGA GCA ATC GAA AGA TT - 3'), Nmult22: InF (5' - ATT GCC AAG ACG AGA GAA GTA 3') y Nmult22:RR (5' TCG CTT GAC CCT ATA ACG AGT A 3'); y para el reconocimiento de secuevares los iniciadores Mus 06: F (5' - GCT GGC ATT GCT CCC GCT CAC - 3'), Mus 06: R (5' - TCG CTT CCG CCA AGA CGC - 3'), Mus 20: F (5' - CGG GTC GCT GAG ACG AAT ATC - 3'), Mus 20: R (5' - GCC TTG TCC AGA ATC CGA ATG - 3'), Mus 35: F (5' - GCA GTA AAG AAA CCC GGT GTT - 3'), Mus 35: R (5' - TCT GGC GAA AGA CGG GAT GG - 3'), S128 F: (5' - CGT TCT CCT TGT CAG CGA TGG - 3'), y S128: R (5' - CCC GTG TGA CCC CGA TAG C - 3').

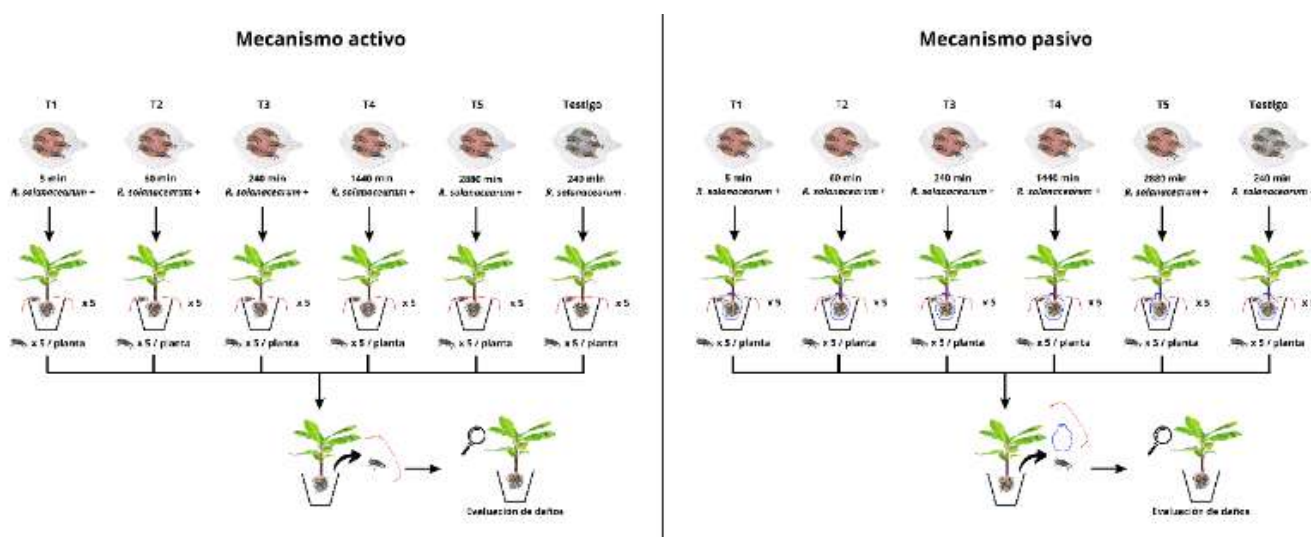
### Mecanismos de *C. sordidus* para infectar plantas sanas de banano con *R. solanacearum* raza 2

Se llevaron a cabo dos experimentos: en uno de ellos se estudió el mecanismo activo y en el otro el mecanismo pasivo de infección del *C. sordidus* sobre plantas de banano sanas con *R. solanacearum* raza 2. Los picudos fueron alimentados previamente con tejido vegetal de banano. El experimento se realizó con plantas individuales en macetas. Para ambos mecanismos se evaluaron 6 tratamientos:

**Cuadro 1.** Tratamientos a evaluar en el mecanismo activo y pasivo de *C. sordidus* para infectar plantas sanas de banano con *R. solanacearum* raza 2.

Tratamiento	Tiempo (min) de alimentación de <i>C. sordidus</i> con tejido vegetal de banano	Estado del alimento
T1	5	<i>R. solanacearum</i> +
T2	60	<i>R. solanacearum</i> +
T3	240	<i>R. solanacearum</i> +
T4	1440	<i>R. solanacearum</i> +
T5	1880	<i>R. solanacearum</i> +
Testigo	240	<i>R. solanacearum</i> -

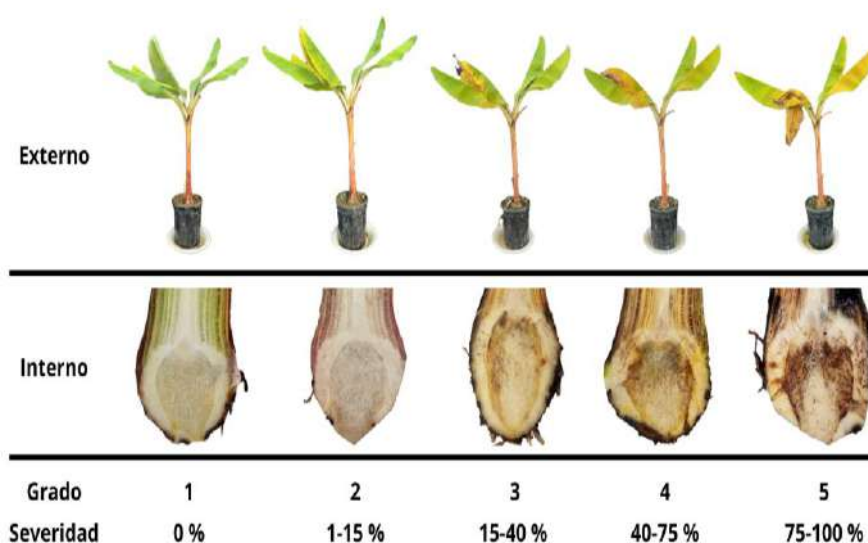
Con respecto al mecanismo activo, se colocaron grupos de 5 insectos en cada tratamiento. Transcurrido cada uno de los tiempos de alimentación, se colocaron los grupos de insectos dentro de macetas previamente sembradas con plantas de 80 cm de alto y posteriormente confinados con malla antiáfidos por 1 semana. Luego de este tiempo, los insectos se removieron manualmente. Cada tratamiento contó con 5 repeticiones, utilizando una planta por repetición (Figura 2). Paralelamente, el mecanismo pasivo se desarrolló de la misma manera que en el mecanismo activo, con la diferencia de que la planta completa fue aislada para evitar que los insectos se alimenten de ella (Figura 2).



**Figura 2.** Evaluación del mecanismo activo y pasivo de *C. sordidus* para infectar plantas sanas de banano con *R. solanacearum* raza 2.

### Evaluación de síntomas causados por *R. solanacearum* en las plantas

Los daños se evaluaron durante 116 días (después de retirar los insectos de las plantas). Las plantas sintomáticas se cosecharon cuando la severidad se encontraba entre el grado 3 y 4 (Figura 3), para posteriormente ser aisladas en medio TZC. Así mismo, aquellas plantas que no expresaron síntomas o evidencia de infección por *R. solanacearum* raza 2, igualmente fueron cosechadas y aisladas en medio TZC con el fin de averiguar si había presencia de plantas asintomáticas.



**Figura 3.** Escala de severidad de Moko en plantas de banano (*Musa AAA*).

### **Análisis estadístico**






Se realizó un análisis estadístico descriptivo para evaluar la adquisición externa e interna de *Ralstonia solanacearum* raza 2 por *Cosmopolites sordidus* en función del tiempo de contacto con tejido de banano infectado, así como para la caracterización morfológica del patógeno y la evaluación de los mecanismos pasivos y activos de transmisión a plantas sanas.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Adquisición externa e interna de *R. solanacearum* raza 2 por *C. sordidus***






Se demostró que *C. sordidus* adquiere *R. solanacearum* raza 2 tanto de manera externa como interna después de haber estado en contacto con material vegetal enfermo de Moko a partir de los 5 min de alimentación (Figura 4).

**Adquisición externa**

Tiempo de alimentación (min)	Repetición de <i>C. sordidus</i>				
	#1 	#2 	#3 	#4 	#5 
5	-	+	++	-	++++
60	-	++++	+	+	+
240	-	+	+	+	++

+ Colonia *R. solanacearum* raza 2 aislada de *C. sordidus*  
- Ausencia de colonias de *R. solanacearum* raza 2 aisladas de *C. sordidus*

**Adquisición interna**

Tiempo de alimentación (min)	Repetición de <i>C. sordidus</i>				
	#1 	#2 	#3 	#4 	#5 
5	++	-	-	-	-
60	-	-	+	-	++
240	+	+	-	-	++

+ Colonia *R. solanacearum* raza 2 aislada de *C. sordidus*  
- Ausencia de colonias de *R. solanacearum* raza 2 aisladas de *C. sordidus*

**Figura 4.** Colonias de *R. solanacearum* raza 2 aisladas de la parte externa e interna de *C. sordidus* de acuerdo con los diferentes tiempos de alimentación.

Estos resultados demuestran que este insecto no solo es importante por su daño directo, sino también por su potencial como acarreador de patógenos en el cultivo de banano. Hallazgos similares descritos por Were *et al.* (2015) en Uganda, demostraron la presencia de *Xanthomonas campestris* pv. *musacearum* en *C. sordidus*, siendo esta bacteria la responsable de importantes pérdidas de la producción bananera. Otro estudio que evidencia el papel de *C. sordidus* como vector fue documentado por Guillén (2021), el cual aisló colonias de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 1 de la parte externa e interna del picudo.

De acuerdo con Gold *et al.* (1999), como se citó en Were *et al.*, (2015) y Vinatier *et al.* (2010), el picudo negro se mueve libremente entre las plantaciones de banano, con desplazamientos que pueden ir de 9 m en 24 h hasta 30 m en 3 meses. Esto evidencia la capacidad de *C. sordidus* para movilizarse entre las plantaciones de banano y, por consiguiente, de transportar inóculo de *R. solanacearum* raza 2 desde una planta enferma de Moko a una sana, favoreciendo su diseminación.

Por otro lado, se obtuvo mayor cantidad de colonias de *R. solanacearum* raza 2 en los aislamientos externos en comparación con los internos, coincidiendo con los resultados obtenidos por Were *et al.* (2015) y Guillén (2021), los cuales obtuvieron una mayor carga bacteriana de *Xanthomonas campestris* pv. *musacearum* y fúngica de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 1, respectivamente, en la parte externa de *C. sordidus*. Este comportamiento puede deberse por diversas razones, como lo es la existencia de una mayor superficie de contacto de la parte externa (patas, cabeza, tórax, abdomen, entre otros) del picudo con el tejido vegetal enfermo en comparación con el sistema digestivo. Otro factor es la presencia de setas o pubescencia en sus patas, que pueden favorecer la adquisición y acarreo de células bacterianas (Lozano, 2005;

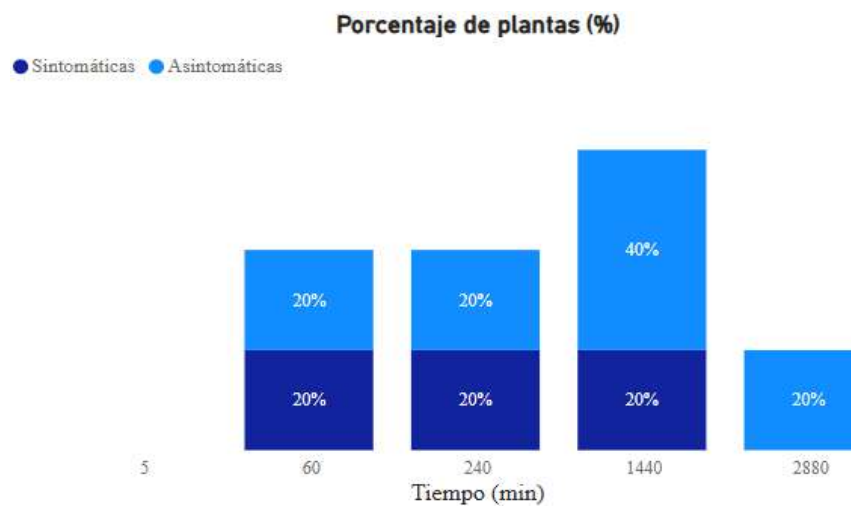
Vallejo *et al.*, 2007). De acuerdo con Vinatier *et al.* (2010), *C. sordidus* tiene la capacidad de transportar más de su propio peso, esto los convierte en expertos acarreadores de partículas y con ello, posibles inóculos de patógenos, como es el caso estudiado con *R. solanacearum* raza 2.

### **Mecanismo activo de *C. sordidus* para infectar plantas sanas de banano con *R. solanacearum* raza 2**

El picudo negro logró infectar plantas sanas de banano con *R. solanacearum* raza 2 mediante un mecanismo activo. De los cinco tiempos de alimentación evaluados, tres presentaron un 20 % de sus plantas sintomáticas (60, 240 y 1440 min) (Figura 5). Estos resultados demostraron el potencial de *C. sordidus* como vector de *R. solanacearum* raza 2 en el cultivo de banano, lo que representa un desafío sobre la patogenicidad de la bacteria.

Resultados similares encontraron Were *et al.* (2015) y Guillén (2021), demostraron que *C. sordidus* tiene la capacidad de infectar plantas sanas de banano con *Xanthomonas campestris* pv. *musacearum* y *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 1. Estos hallazgos evidencian a *C. sordidus* como un enemigo silencioso del cultivo de banano, cuya presencia en zonas afectadas por Moko representa una situación alarmante, dado su potencial de diseminación. Así mismo, el daño mecánico que realiza este insecto durante la alimentación y/u oviposición sirve como puerta de entrada a otros patógenos (Monge, 2015), ya que la hembra excava con su aparato bucal en las vainas foliares y en la parte superior del cormo para colocar sus huevos (Olivares *et al.*, 2018).

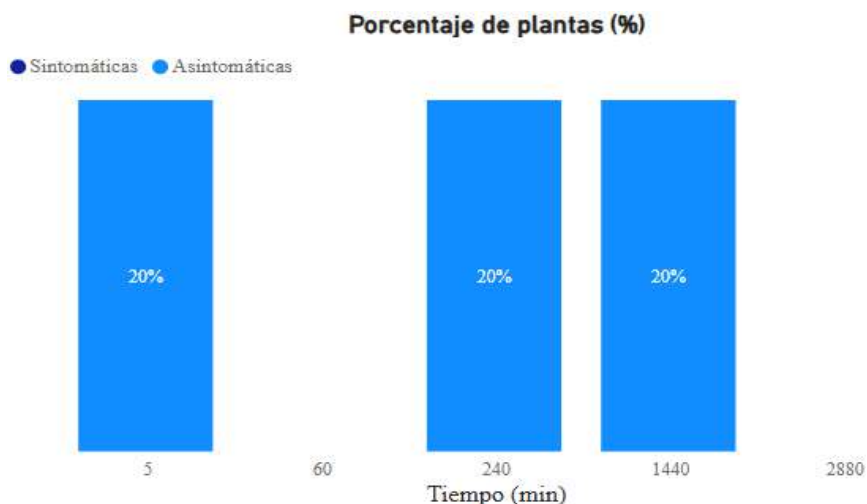
Adicionalmente, se lograron aislar colonias de *R. solanacearum* raza 2 de plantas asintomáticas de Moko. Dicha bacteria se aisló de un 20 % de las plantas del tratamiento de 60 min; un 20 % en el de 240 min; un 40 % en el de 1440 min; y un 20 % en el de 2880 min (Figura 5). Este comportamiento de la especie *R. solanacearum* se ha reportado en cultivos de papa y tomate, en que la bacteria puede permanecer latente por períodos prolongados en plantas infectadas luciendo asintomáticas (Champoiseau, 2009; Rueda *et al.*, 2014). En tomate, las temperaturas frescas promueven la latencia de la bacteria en las plantas (Champoiseau, 2009). También las condiciones adversas o falta de nutrientes pueden provocar la latencia de *R. solanacearum* (Botella *et al.*, 2022). Estos casos sugieren una posible diseminación inadvertida de la enfermedad, a pesar de que aún se desconoce la causa puntual de este fenómeno.



**Figura 5.** Mecanismo Activo: Porcentaje de plantas sintomáticas y asintomáticas de Moko de acuerdo con el tiempo de alimentación de *C. sordidus* con tejido vegetal enfermo de Moko.

### **Mecanismo pasivo de *C. sordidus* para infectar plantas sanas de banano con *R. solanacearum* raza 2**

En el experimento del mecanismo pasivo no se encontraron plantas sintomáticas de Moko, sin embargo, fue posible aislar *R. solanacearum* raza 2 a partir de plantas asintomáticas. La bacteria se aisló de un 20 % de las plantas del tratamiento de 5, 240 y 1440 min (Figura 6). Estos resultados también coinciden con lo señalado por Champoiseau (2009) y Rueda *et al.* (2014), quienes indican que la bacteria puede permanecer latente en plantas de tomate y papa, manteniéndose asintomáticas. Esto demuestra que *C. sordidus* puede dispersar células bacterianas y con ello, provocar infecciones en plantas sanas, ya sea por el contacto del insecto con partículas de suelo o a través de la producción de heces contaminadas con *R. solanacearum* raza 2.



**Figura 6.** Mecanismo Activo: Porcentaje de plantas sintomáticas y asintomáticas de Moko de acuerdo con el tiempo de alimentación de *C. sordidus* con tejido vegetal enfermo de Moko.

Los resultados obtenidos evidencian el papel de *C. sordidus* en la vectorialidad de *R. solanacearum* raza 2. Si bien el control de sus poblaciones es relevante por el daño directo que ocasiona, la situación se torna aún más crítica cuando coincide con la presencia de Moko en zonas productivas de banano. De ahí la importancia de comprender las interacciones entre planta, patógeno e insecto vector, ya que este conocimiento resulta esencial para reducir la aparición y diseminación de enfermedades en los cultivos.

## CONCLUSIONES

Se demostró que el picudo negro *C. sordidus* tiene la capacidad de transportar inóculo de *R. solanacearum* raza 2 tanto externa como internamente, lo que representa una amenaza para zonas bananeras donde hay presencia de Moko.

El picudo negro previamente alimentado con tejido vegetal enfermo de Moko, puede infectar plantas sanas de banano con *R. solanacearum* raza 2 mediante el mecanismo activo, provocando síntomas de la enfermedad.

El no observar plantas sintomáticas no implica la ausencia de *R. solanacearum* raza 2, lo cual sugiere que la bacteria puede permanecer de manera latente en las plantas de banano.

Los resultados obtenidos indican que el picudo negro *C. sordidus* es vector de la bacteria *R. solanacearum* raza 2, causante de la enfermedad del Moko en el cultivo de banano.

## REFERENCIAS

- Amador M, Molina D, Guillén C, Parajeles E, Jiménez K, y Uribe L. 2015. Utilización del nematodo entomopatógeno *Heterorhabditis atacamensis* CIA-NE07 en el control del picudo del banano *Cosmopolites sordidus* en condiciones *in vitro*. *Agronomía Costarricense*, 39(3), 47–60. [www.mag.go.cr/revagr/index.htm](http://www.mag.go.cr/revagr/index.htm) [www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)
- Botella M, Suárez T, Alfaro A, y Siverio F. 2022. Valoración de las medidas de erradicación de *Ralstonia solanacearum* en la isla de Tenerife. Informe técnico n° 2. [https://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/agec\\_767\\_Ralstonia.pdf](https://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/agec_767_Ralstonia.pdf)
- Champoiseau P. 2009. Bacterial Wilt of Tomato. Plant Pathology Department, University of Florida. [https://plantpath.ifas.ufl.edu/rsol/RalstoniaPublications\\_PDF/BacterialWiltTomato\\_Revised\\_PDF.pdf](https://plantpath.ifas.ufl.edu/rsol/RalstoniaPublications_PDF/BacterialWiltTomato_Revised_PDF.pdf)
- Guillén Sánchez C. 2021. The role of banana weevil *Cosmopolites sordidus* in the epidemiology of the Panama disease *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 1. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03572373>
- Lozano J. 2005. Entomología, morfología y fisiología de los insectos. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75279/6366273.2014.pdf>
- Monge J. 2015. Detección convencional y molecular de la bacteria *Ralstonia solanacearum* raza 2 agente causal del moko o marchitez bacteriana en insectos y murciélagos asociados al cultivo del banano (*Musa AAA*) en la zona de Guápiles, Limón [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional]. <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/CR.UNA01000282394>
- Montero F. 2020. Moko en banano (*Ralstonia solanacearum*). Universidad de Costa Rica. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01290>
- Olivares N, Guzmán A y Rodríguez F. 2018. *Cosmopolites sordidus* en el cultivo de la banana. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. [www.inia.cl/servicios/fichastecnicas-y-videos/](http://www.inia.cl/servicios/fichastecnicas-y-videos/)
- Rueda Edgar, Hernández L, Holguín R, Ruiz F, López J, Huez M, Jiménez J, Borboa J y Ortega J. 2014. *Ralstonia solanacearum*: Una enfermedad bacteriana de importancia cuarentenaria en el cultivo de *Solanum tuberosum* L. *INVURNUS*, 9(1): 24-36.
- Vallejo L, Sánchez R y Salgado M. 2007. Redescrición del adulto y descripción de los estados inmaduros de *Cosmopolites sordidus* Germar, 1824 (Coleoptera: Curculionidae), el picudo negro barrenador del plátano en Colombia. *Museo de Historia Natural*, 11. <http://www.scielo.org.co/pdf/bccm/v11n1/v11n1a17.pdf>
- Vargas A, Watler W, Morales M y Vignola R. 2017. Ficha Técnica Cultivo de Banano. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8205.pdf>
- Vinatier F, Chailleux A, Duyck PF, Salmon F, Lescouret F y Tixier, P. 2010. Radiotelemetry unravels movements of a walking insect species in heterogeneous environments. *Animal Behaviour*, 80, 221– 229. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2010.04.022>
- Were E, Nakato GV, Ocimati W, Ramathani I, Olal S y Beed F. 2015. The banana weevil, *Cosmopolites sordidus* (Germar), is a potential vector of *Xanthomonas campestris* pv. *musacearum* in bananas. *Canadian Journal of Plant Pathology* 37(4), 427–434. <https://doi.org/10.1080/07060661.2015.1113444>

# Impacto de la erradicación con metam-sodio y urea sobre *Ralstonia solanacearum* y la salud del suelo en banano – Finca comercial Universidad EARTH

Desirée Karin Chang Villatoro<sup>1</sup>, Nahomi Gisele Grandes Solís<sup>1</sup>, Miguel Ángel Dita Rodríguez<sup>2</sup>, Adrián Jiménez Zúñiga<sup>1</sup>,  
Jaime Honorato Junior<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad EARTH; Costa Rica, <sup>2</sup>Investigador independiente, Brasil

**\*Autor de correspondencia:**

Jaime Honorato Junior  
jhonorato@earth.ac.cr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**

Chang Villatoro DK, Grandes Solís NG, Dita Rodríguez MA, Jiménez Zúñiga A, Honorato Junior J. 2026. Impacto de la erradicación con metam-sodio y urea sobre *Ralstonia solanacearum* y la salud del suelo en banano – Finca comercial Universidad EARTH. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 122 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26122>

## RESUMEN

El moko del banano, causado por *Ralstonia solanacearum* raza 2, representa una de las principales limitantes fitosanitarias en musáceas en América Latina. El método convencional de erradicación se basa en la aplicación de metam-sodio (Vapam® 51 GE), fumigante químico de amplio espectro. Sin embargo, su impacto sobre la microbiota y la dinámica química del suelo genera cuestionamientos sobre su sostenibilidad. El presente estudio comparó el tratamiento convencional con metam-sodio y una alternativa basada en la aplicación de urea, evaluando la población de *R. solanacearum* y los cambios en factores bióticos y abióticos del suelo. Se establecieron tres experimentos independientes bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento. Se realizaron evaluaciones en T0, T1 (90 días) y T2 (180 días). El metam-sodio mostró reducción rápida del patógeno entre T0 y T1, seguida de un rebrote en T2. La urea mantuvo poblaciones bajas y estables durante todo el periodo. La alternativa con urea evidenció menor alteración de la microbiota del suelo. Los resultados indican que la urea puede constituir una estrategia complementaria para el manejo sostenible del moko en sistemas comerciales.

**Palabras clave:** *Musa* spp., Tratamiento de suelo, Microbiota de suelo, Rizosfera, Manejo integrado de enfermedades

## ABSTRACT

Moko disease, caused by *Ralstonia solanacearum* race 2, is one of the main phytosanitary constraints affecting banana production in Latin America. The conventional eradication method relies on metam-sodium (Vapam® 51 GE), a broad-spectrum soil fumigant. However, its impact on soil microbial communities and chemical dynamics raises sustainability concerns. This study compared the conventional metam-sodium treatment with an alternative based on urea application, evaluating *R. solanacearum* populations and changes in biotic and abiotic soil factors. Three independent experiments were established under a completely randomized design with three replicates per treatment. Evaluations were conducted at T0, T1 (90 days), and T2 (180 days). Metam-sodium caused a rapid reduction of the pathogen between T0 and T1, followed by a population rebound at T2. Urea maintained low and stable pathogen levels throughout the evaluation period and caused less disruption to soil microbiota. Results suggest that urea represents a promising complementary strategy for sustainable moko management in commercial systems.

**Keywords:** *Musa* spp., Soil treatment, Soil microbiota, Rhizosphere, Integrated diseases management



## INTRODUCCIÓN

El moko del banano es causado por *Ralstonia solanacearum* (Smith 1896) Yabuuchi *et al.* (1995), complejo de especies bacterianas responsables de marchiteces vasculares en diversos cultivos (Fegan y Prior, 2006). La raza 2 afecta principalmente musáceas y se distribuye ampliamente en América Latina. La bacteria sobrevive en suelo, residuos vegetales y material de siembra, y se disemina por agua, herramientas contaminadas e insectos (SENASICA, 2023).

La ausencia de variedades comerciales resistentes obliga a implementar estrategias basadas en erradicación de focos y desinfección rigurosa. En sistemas comerciales, el metam-sodio es uno de los productos más utilizados para el tratamiento del suelo tras la eliminación de plantas enfermas (Torres-González *et al.*, 2013). No obstante, los fumigantes químicos pueden alterar significativamente la microbiota y la dinámica de carbono y nitrógeno del suelo (Sennett *et al.*, 2022).

La urea ha sido propuesta como alternativa debido a que su hidrólisis puede generar acumulación de nitrito y cambios de pH que suprimen patógenos del suelo. Sin embargo, su impacto específico sobre *R. solanacearum* en condiciones de producción comercial requiere validación.

El objetivo de este estudio fue comparar el efecto del metam-sodio y la urea sobre la población de *R. solanacearum* y sobre la salud del suelo en la Finca Comercial de la Universidad EARTH.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio experimental

El estudio se realizó en la Finca Comercial de Banano de la Universidad EARTH, Guácimo, Limón, Costa Rica.

### Diseño experimental

Se establecieron tres experimentos independientes en focos confirmados de moko. Se utilizó un diseño completamente al azar con dos tratamientos y tres repeticiones: 1) Metam-sodio (Vapam® 51 GE); 2) Urea. Las evaluaciones se realizaron en T0 (antes de aplicación), T1 (90 días) y T2 (180 días).

### Confirmación del patógeno

Se aislaron colonias en medios selectivos, se realizaron pruebas rápidas de diagnóstico y confirmación molecular por genotipificación, corroborando la presencia de *R. solanacearum* en todos los focos evaluados (Torres-González *et al.*, 2013).

### **Evaluaciones microbiológicas**

Las poblaciones bacterianas se cuantificaron como unidades formadoras de colonia (UFC mL<sup>-1</sup>) tras incubación a 28 °C. Se evaluó también la diversidad bacteriana y fúngica total mediante recuentos en placa (Patiño *et al.*, 2022; Pavone, 2022).

### **Análisis químicos del suelo**

Se determinó acidez extractable (KCl 1 N), macro y microelementos mediante Mehlich 3 y carbono/nitrógeno total por combustión seca (método de Dumas).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Contexto fitopatológico y epidemiológico del moko**

Los resultados obtenidos confirman que el moko del banano continúa siendo una de las enfermedades bacterianas más limitantes para los sistemas productivos de musáceas en condiciones tropicales húmedas, especialmente en regiones caracterizadas por alta precipitación, temperaturas elevadas y producción intensiva. Este comportamiento coincide con lo reportado para América Latina y el Caribe, donde el cultivo de banano enfrenta desafíos fitosanitarios estructurales asociados a patógenos vasculares (Dita *et al.*, 2011; SENASICA, 2023).

La dinámica epidemiológica observada reafirma el carácter sistémico y altamente agresivo de *Ralstonia solanacearum*, cuya colonización vascular compromete rápidamente el transporte de agua y fotoasimilados, conduciendo al marchitamiento irreversible de la planta (Hayward, 1991; Denny, 2006). La sintomatología externa e interna descrita en campo concuerda con los patrones diagnósticos establecidos para el complejo especie *R. solanacearum* (García *et al.*, 2019).



Figura 1. Planta con síntomas de Moko *R. solanacearum*.



Figura 2. Maduración prematura, agrietamiento de la cáscara y pudrición seca de la pulpa en frutos de banano (A) y plátano (B) infectados por *R. solanacearum*.

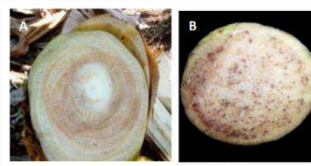


Figura 4. Corte transversal de pseudotallo (A) y raquis de una planta afectada (B). Se observa una evidente decoloración vascular.

**Figura 1.** Sintomatología del moko en banano. Síntomas externos e internos característicos del moko del banano (marchitez foliar, colapso del pseudotallo y necrosis vascular. Fuente: Corbana, 2019).

En términos espaciales, la progresión de la enfermedad sugiere un patrón agregado inicial con expansión radial posterior, consistente con diseminación mecánica por herramientas contaminadas, movimiento de suelo y agua de escorrentía. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado para el complejo *R. solanacearum*, cuya alta variabilidad genética y plasticidad ecológica favorecen su persistencia en sistemas tropicales (Fegan & Prior, 2005; Fegan & Prior, 2006).

#### **Efecto de metam-sodio y urea sobre poblaciones de *R. solanacearum***

El metam-sodio redujo la población bacteriana de aproximadamente 25 a 5 UFC mL<sup>-1</sup> a los 90 días; sin embargo, a los 180 días se observó un incremento hasta valores cercanos a 16–18 UFC mL<sup>-1</sup>, evidenciando un efecto transitorio. Este comportamiento es coherente con la acción fumigante de liberación rápida del metam-sodio (metilisotiocianato), cuyo efecto disminuye conforme se restablece la microbiota edáfica (An American Vanguard Company, 2022; Sennett *et al.*, 2022).

En contraste, la urea mantuvo poblaciones entre 2–5 UFC mL<sup>-1</sup> durante todo el periodo de evaluación, sin evidenciar rebrote significativo. Este efecto podría estar asociado a cambios en la dinámica microbiana y procesos de nitrificación que generan condiciones menos favorables para la supervivencia del patógeno (Staley *et al.*, 2018). La estabilidad observada sugiere un mecanismo indirecto vinculado a modificaciones en el ambiente edáfico más que a una acción bactericida inmediata.

El metam-sodio produjo una reducción amplia de la microbiota general en T1, con recuperación parcial en T2, fenómeno consistente con estudios que documentan alteraciones en el carbono y nitrógeno del suelo tras fumigación química (Sennett *et al.*, 2022). Por su parte, la urea mostró menor alteración en la diversidad bacteriana y fúngica, incrementando temporalmente el nitrógeno disponible sin generar cambios críticos en pH o macroelementos.

Estos resultados coinciden parcialmente con reportes previos sobre manejo químico del moko, donde la eficacia depende tanto del producto como de la interacción con las condiciones edafoclimáticas y prácticas culturales (Torres-González *et al.*, 2013).

### **Manejo integrado y dinámica de diseminación del moko**

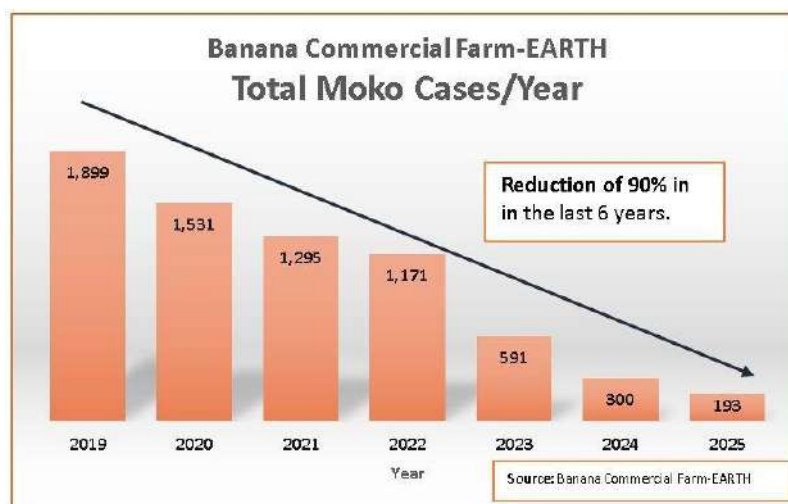
Un aspecto crítico evidenciado es la interacción entre prácticas agronómicas y presión de inóculo. La ausencia de protocolos estrictos de desinfección y erradicación temprana incrementa significativamente la tasa de infección secundaria, tal como ha sido descrito en manuales técnicos de manejo regional (CORBANA, 2019; SENASICA, 2023).

Desde una perspectiva de manejo integrado, los resultados confirman que no existe una estrategia única eficaz. El control requiere un enfoque multifactorial que combine: 1) Diagnóstico temprano (García *et al.*, 2019); 2) Erradicación sanitaria inmediata (Hayward, 1991); 3) Manejo del movimiento de suelo y agua (CORBANA, 2019); 4) Capacitación del personal (Finca comercial Universidad EARTH); 5) Uso de material de siembra certificado y, cuando sea posible, genotipos con tolerancia relativa (Valencia *et al.*, 2014).

El manejo preventivo resulta significativamente más eficiente que las acciones correctivas tardías, especialmente considerando la capacidad de supervivencia del patógeno en restos vegetales y hospederos alternativos (Denny, 2006).

### **Validación en finca comercial – Universidad EARTH**

La experiencia operacional en la Finca Comercial de la Universidad EARTH proporciona evidencia cuantitativa del impacto del manejo integrado. En 2019 se registraron 1.889 casos (4,5 casos ha<sup>-1</sup>), afectando más del 10 % del área sembrada. Tras el fortalecimiento del programa basado en detección temprana, erradicación inmediata, protocolos estrictos de desinfección y capacitación continua, los casos se redujeron a 193 en 2025 (0,4 casos ha<sup>-1</sup>), equivalente a una disminución del 90 %.



**Figura 2.** Evolución de casos de moko detectados en Finca comercial – Universidad EARTH.

Este comportamiento confirma que la disciplina operativa y la cohesión del equipo técnico son determinantes en la reducción de incidencia, más allá del insumo químico utilizado. Modelos similares han sido descritos como estrategias exitosas de contención en sistemas comerciales (Sánchez & García, documento técnico).

Asimismo, el protocolo implementado (flujo de decisiones sanitarias) demuestra que la integración sistemática de monitoreo, diagnóstico y bioseguridad puede desacelerar significativamente la diseminación del patógeno.



**Figura 3.** Esquema del protocolo de manejo integrado implementado en la finca comercial (flujo de decisiones sanitarias).

### Diversidad genética y sostenibilidad futura

La variabilidad entre razas y filotipos del complejo *R. solanacearum* influye directamente en agresividad y rango de hospedantes, lo que subraya la necesidad de caracterización molecular regional (Fegan & Prior, 2005; Fegan & Prior, 2006). Esta diversidad genética constituye un desafío para estrategias basadas exclusivamente en control químico.

En términos socioeconómicos, el impacto del moko trasciende la reducción del rendimiento, afectando la estabilidad productiva y los costos asociados a erradicación y cuarentenas internas (SENASICA, 2023). Bajo escenarios de cambio climático, modificaciones en temperatura y régimen hídrico podrían alterar los patrones epidemiológicos, reforzando la necesidad de vigilancia fitosanitaria continua (Dita *et al.*, 2011).

## CONCLUSIONES

El metam-sodio mostró acción rápida pero efecto transitorio sobre las poblaciones de *R. solanacearum*.

La urea evidenció supresión más estable del patógeno y menor impacto negativo sobre la microbiota del suelo.

El manejo sostenible del moko requiere integrar alternativas químicas y nutricionales dentro de programas disciplinados de erradicación y bioseguridad.

La validación en finca comercial demostró que la combinación de conocimiento técnico, monitoreo sistemático y disciplina operativa puede reducir significativamente la incidencia de la enfermedad.

## REFERENCIAS

- An American Vanguard Company. 2022. Ficha técnica Vapam® 51 GE.
- CORBANA. 2019. Diseminación del moko en cultivos de banano y plátano. Corporación Bananera Nacional.
- Denny TP. 2006. Plant pathogenic *Ralstonia* species. In: Gnanamanickam, S.S. (Ed.), Plant-Associated Bacteria. Springer.
- Dita MA, *et al.* 2011. Banana in Latin America and the Caribbean: current state and challenges. *Acta Horticulturae* 986:365–380.
- Fegan M, Prior P. 2006. Diverse members of the *Ralstonia solanacearum* species complex cause bacterial wilts of banana. *Australasian Plant Pathology* 35:93–101.
- Fegan M, Prior P. 2005. How complex is the “*Ralstonia solanacearum* species complex”? In: Allen, C., Prior, P., Hayward, A.C. (Eds.), *Bacterial Wilt Disease and the Ralstonia solanacearum Species Complex*. APS Press.
- García R, Kerns J, Thiessen L. 2019. *Ralstonia solanacearum* species complex: diagnostic guide. *Plant Health Progress* 20:7–13.
- Hayward AC. 1991. Biology and epidemiology of bacterial wilt caused by *Pseudomonas solanacearum*. *Annual Review of Phytopathology* 29, 65–87.
- Sánchez G, García J. (Año del documento base). Manejo del moko del banano en sistemas tropicales. Documento técnico.

- 
- Sennett LB, Burton DL, Goyer C, Zebarth BJ. 2022. Chemical fumigation alters soil carbon and nitrogen dynamics. *Geoderma* 419:115878.
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). 2023. *Ralstonia solanacearum* raza 2: Moko del plátano. Gobierno de México.
- Staley, *et al.* 2018. Urea amendment decreases microbial diversity. *Frontiers in Microbiology* 9:634.
- Torres-González C, Casas M, Díaz J. 2013. Manejo de *Ralstonia solanacearum* raza 2 a través de productos químicos y biológicos. *Iteckne* 10:217–233.
- Valencia L, Álvarez-Cabrera E, Castaño-Zapata J. 2014. Resistencia de genotipos de plátano y banano a *Ralstonia solanacearum* raza 2. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

## Bacterias nativas antagonistas de *Ralstonia solanacearum* raza 2 agente causal del Moko en banano

Nancy Chaves Méndez<sup>1</sup>, Gabriel Bogantes León<sup>1</sup>, Rafael Segura Mena<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dirección de Investigaciones, Corporación Bananera Nacional (CORBANA)

**\*Autor de correspondencia:**

Nancy Chaves Méndez  
nchaves@corbana.co.cr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**

Chaves Méndez N, Bogantes León G, Segura Mena R. 2026 Bacterias nativas antagonistas de *Ralstonia solanacearum* raza 2 agente causal del Moko en banano. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 123 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26123>



### RESUMEN

La marchitez bacteriana del banano causada por *Ralstonia solanacearum* raza 2, conocida como enfermedad del Moko, representa una de las principales limitaciones fitosanitarias en la producción bananera tropical debido a la persistencia del patógeno en el suelo y a la limitada disponibilidad de cultivares resistentes. En este contexto, el uso de microorganismos benéficos ha sido propuesto como una estrategia sostenible para el manejo de patógenos del suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar la actividad antagonista *in vitro* de bacterias aisladas de suelos de plantaciones de banano con historial de la enfermedad del Moko en la región Caribe de Costa Rica contra *R. solanacearum*. Se obtuvieron 60 aislamientos bacterianos que fueron evaluados mediante ensayos de confrontación directa para determinar su potencial antagonista. De estos, 26 aislamientos mostraron actividad inhibitoria frente al patógeno, con porcentajes de inhibición que oscilaron entre 3.8 % y 55.0 %. Los aislamientos COR-CB-022, PDAC4 y BQ42 presentaron los mayores niveles de inhibición (55.0 %, 46.3 % y 39.4 %, respectivamente), produciendo halos de inhibición estables. La caracterización morfológica y molecular basada en el análisis del gen 16S rRNA indicó que los aislamientos más promisorios pertenecen al género *Bacillus*. Estos resultados evidencian que los suelos bananeros del Caribe costarricense albergan comunidades bacterianas con potencial de biocontrol, proporcionando una base científica para el desarrollo de estrategias de manejo integrado orientadas a reducir la presión de inóculo del patógeno.

**Palabras clave:** Control biológico, *Bacillus*, Microbiota, Musáceas

### ABSTRACT

Bacterial wilt of banana caused by *Ralstonia solanacearum* race 2, known as Moko disease, represents one of the primary phytosanitary constraints in tropical banana production due to the persistence of the pathogen in soil and the lack of resistant cultivars. In this context, the use of beneficial microorganisms has been proposed as a sustainable strategy for the management of soil-borne pathogens. The objective of this study was to evaluate the *in vitro* antagonistic activity of bacteria isolated from the soils of banana plantations with a history of Moko disease in the Caribbean region of Costa Rica against *R. solanacearum*. A total of 60 bacterial isolates were obtained and evaluated using direct confrontation assays to determine their antagonistic potential. Among them, 26 isolates showed inhibitory activity against the pathogen, with inhibition percentages ranging from 3.8% to 55.0%. The isolates COR-CB-022, PDAC4, and BQ42 exhibited the highest levels of inhibition (55.0%, 46.3%, and 39.4%, respectively), producing stable inhibition halos. Morphological and molecular characterization based on 16S rRNA gene analysis indicated that the most promising isolates belong to the genus *Bacillus*. These results demonstrate that banana plantation soils in the Caribbean region

of Costa Rica harbor bacterial communities with biocontrol potential, providing a scientific basis for the development of integrated management strategies aimed at reducing the pathogen's inoculum pressure.

**Keywords:** Biological control, *Bacillus*, Microbiota, Musaceae

## INTRODUCCIÓN

El Moko del banano, causado por *Ralstonia solanacearum* raza 2, constituye una de las enfermedades más destructivas del cultivo en regiones tropicales y subtropicales (Belalcázar, 2004; Valencia, 2014). Su manejo resulta particularmente complejo debido a la persistencia del patógeno en el suelo, su amplio rango de hospederos, la elevada variabilidad genética del complejo de especies y la ausencia de variedades comerciales con resistencia comprobada (Castañeda & Espinosa, 2005). En Costa Rica, la enfermedad ha mostrado un incremento sostenido en los últimos años, generando pérdidas económicas significativas y evidenciando la necesidad de estrategias de manejo más sostenibles y ajustadas a las condiciones edafoclimáticas locales (Chaves *et al.*, 2025).

Históricamente, las estrategias de manejo de Moko se han basado principalmente en la erradicación de plantas enfermas, la desinfección de herramientas, control de vectores y la aplicación de medidas de exclusión sanitaria, complementadas con rotaciones de cultivo y largos períodos de barbecho (Ojeda, 2023). Sin embargo, estas prácticas suelen ser insuficientes para reducir la presión de inóculo a niveles seguros, especialmente en suelos con alta carga microbiana y condiciones favorables para la sobrevivencia del patógeno. Ante estas limitaciones, el control biológico surge como una alternativa prometedora dentro de los programas de manejo integrado del Moko, al ofrecer un enfoque ambientalmente seguro y compatible con sistemas de producción convencional y orgánica (Hasinu *et al.*, 2021).

Diversos estudios han documentado el potencial de bacterias del género *Bacillus* y de hongos como *Trichoderma* spp. para suprimir *R. solanacearum* mediante distintos mecanismos de acción, entre ellos la producción de antibióticos, sideróforos y enzimas líticas, así como por competencia por espacio y nutrientes (Molinari & Quintana, 2025). De manera complementaria, la fagoterapia agrícola basada en el uso de bacteriófagos líticos específicos ha demostrado resultados alentadores en condiciones de laboratorio e invernadero, logrando reducir significativamente la incidencia de la enfermedad mediante el uso de cócteles de fagos activos contra cepas nativas del patógeno (Ramírez *et al.*, 2020; Laprea & Saltos, 2025). En conjunto, estas estrategias biológicas, integradas con prácticas de manejo del suelo y bioenmiendas orgánicas,

representan un enfoque integral orientado no solo a disminuir la incidencia del Moko, sino también a restaurar la salud microbiana y funcionalidad del agroecosistema.

En este contexto, la presente investigación busca contribuir al desarrollo de alternativas biológicas sostenibles para el manejo del Moko del banano en sistemas tropicales, mediante la evaluación *in vitro* de microorganismos bacterianos nativos con actividad antagonista frente a *Ralstonia solanacearum*, aislados de suelos rizosféricos y de suelos con historial de Moko.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Área de estudio y procedencia de los aislamientos**

El estudio se desarrolló en el Laboratorio de Control Biológico y Biología Molecular de la Corporación Bananera Nacional (CORBANA), empleando microorganismos nativos previamente aislados de suelos bananeros del Caribe de Costa Rica, provenientes de fincas con historial confirmado de Moko (*R. solanacearum* raza 2).

Las muestras de suelo se recolectaron en la zona rizosférica de plantas aparentemente, así como en áreas aledañas a sitios donde se realizó la erradicación de plantas afectadas por Moko. El muestreo se realizó a una profundidad de 0–20 cm utilizando herramientas previamente desinfectadas. Las muestras fueron almacenadas en bolsas estériles, conservadas a 4 °C y procesadas en el laboratorio en un período máximo de 48 horas posteriores a su recolección.

### **Aislamiento, purificación y selección de microorganismos nativos**

Los aislamientos bacterianos se obtuvieron a partir de muestras de suelo mediante diluciones seriadas ( $10^{-1}$  a  $10^{-5}$ ) y siembra en medios de cultivo generales y selectivos, incluyendo Agar nutritivo y King's B, este último para bacterias fluorescentes. Tras la incubación, se seleccionaron un total de 60 colonias con morfologías contrastantes, las cuales fueron purificadas mediante estría sucesiva hasta obtener cultivos axénicos. Las cepas purificadas fueron caracterizadas preliminarmente con base en criterios fenotípicos, incluyendo morfología colonial, tinción de Gram y producción de pigmentación. Posteriormente, los aislamientos seleccionados se conservaron en glicerol al 20 % y almacenados a  $-80$  °C para su evaluación posterior en los ensayos de antagonismos *in vitro* (Hasinu *et al.*, 2021; Molinari & Quintana, 2025).

### **Cepa del patógeno y condiciones de cultivo**

La cepa de *Ralstonia solanacearum* raza 2 utilizada en el estudio fue aislada a partir de plantas de banano con síntomas de Moko y confirmada molecularmente como

perteneciente al filotipo II, sequevar 3/4/6. La identificación se realizó mediante la amplificación del gen 16S rRNA y la comparación de las secuencias obtenidas con bases de datos de referencia utilizando la herramienta BLAST (Ramírez *et al.*, 2020). El patógeno se mantuvo en medio TTC (cloruro de trifeniltetrazolio) e incubado a 28 °C durante 48 horas. La viabilidad y virulencia de la cepa se verificaron mediante la observación de colonias fluidas de color blanquecino, características de cepas virulentas de *R. solanacearum* (Belalcázar, 2004).

### **Ensayos de antagonismo *in vitro***

La capacidad inhibitoria de los aislamientos bacterianos nativos frente a *R. solanacearum* se evaluó mediante dos metodologías complementarias de antagonismo *in vitro*. En el ensayo de difusión en papel filtro, se utilizaron discos estériles de 6 mm de diámetro (Whatman No. 1), los cuales fueron impregnados con 20 µl de una suspensión bacteriana ajustada a una concentración de 10<sup>8</sup> UFC ml<sup>-1</sup>. Los discos se colocaron sobre placas previamente inoculadas con el patógeno en fase de crecimiento logarítmico.

De manera paralela, se realizó un ensayo de enfrentamiento directo, en el cual los aislamientos antagonistas se inocularon en medio Agar nutritivo (NA) a una distancia aproximada de 2 cm del crecimiento inicial del patógeno. En ambos casos, las placas se incubaron a 28 °C y la inhibición del crecimiento de *R. solanacearum* se evaluó a las 24, 48 y 72 horas posteriores a la incubación.

El efecto antagonista se expresó como porcentaje de inhibición del crecimiento radial del patógeno (I %), el cual se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$I(\%) = \frac{(D_c - D_t)}{D_c} \times 100$$

donde  $D_c$  corresponde al diámetro de crecimiento del patógeno en el control y  $D_t$  al diámetro de crecimiento observado en presencia del aislamiento antagonista (Ojeda, 2023).

### **Caracterización molecular de cepas destacadas**

Las cepas que presentaron un porcentaje de inhibición igual o superior al 30 % fueron seleccionadas para su identificación molecular mediante la amplificación del gen 16S rRNA, utilizando los cebadores universales 27F y 1492R. Las secuencias obtenidas fueron analizadas mediante comparación con bases de datos de referencia empleando la herramienta BLAST del National Center for Biotechnology Information (NCBI), y las cepas fueron clasificadas a nivel taxonómico con base en el porcentaje de identidad de secuencia.

### **Análisis estadístico**

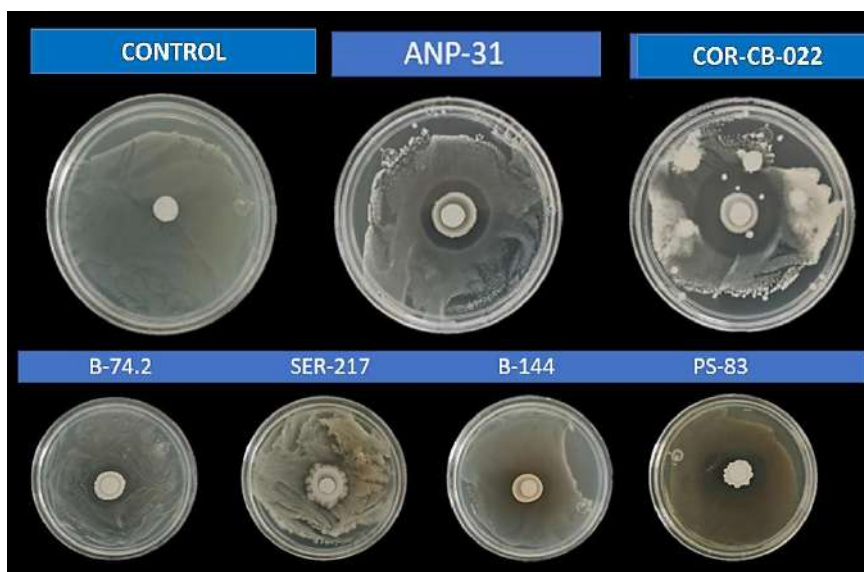
El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, con tres repeticiones por tratamiento. Los datos correspondientes al porcentaje de inhibición fueron sometidos a transferidos a una transformación de raíz cuadrada ( $\sqrt{x + 1}$ ) previa al análisis estadístico. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$ . Todos los análisis se llevaron a utilizando el software R versión 4.3. y los resultados se expresaron como medias  $\pm$  desviación estándar.

### **RESULTADOS**

De los 60 aislamientos bacterianos nativos evaluados, 34 no mostraron un efecto inhibitorio detectable sobre el crecimiento de *R. solanacearum* y fueron descartados (Figura 1). Estos se caracterizaron por la ausencia de halos de inhibición, permitiendo un crecimiento del patógeno comparable al control.

A partir de este primer filtrado, se seleccionaron 26 aislamientos que presentaron algún grado de actividad antagonista frente al patógeno, los cuales fueron sometidos a evaluación cuantitativa. Los valores de inhibición del crecimiento radial oscilaron entre 3.8 % y 55.0 %, lo que evidencia una amplia variabilidad en la respuesta de los microorganismos evaluados (Figura 2). Entre estos, los aislamientos COR-CB-022, PDAC4 y BQ42 destacaron con los niveles de inhibición más elevados, alcanzando promedios de 55.0 %, 46.3 % y 39.4 %, respectivamente. Por su parte, los aislamientos ANP31, PDA2 y ANP11 presentaron niveles de inhibición intermedios, mientras que el resto de las cepas mostró efectos menores, aunque consistentes, sobre el crecimiento del patógeno.

La caracterización fenotípica indicó que los aislamientos con mayor actividad antagonista presentaron una morfología de bacilos Gram positivos. El análisis molecular basado en la amplificación y secuenciación del gen 16S rRNA confirmó que los aislamientos COR-CB-022, PDAC4 y BQ42 pertenecen al género *Bacillus*, mostrando altos niveles de similitud con especies reportadas dentro de este grupo.



**Figura 1.** Evaluación *in vitro* de la actividad antagonica de aislamientos bacterianos nativos frente a *Ralstonia solanacearum*. En la fila superior se observa el Control (crecimiento total del patógeno sin inhibición) y los aislamientos con mayor actividad, destacando COR-CB-022 por la formación de un halo de inhibición claro y definido. En la fila inferior se presentan aislamientos con diferentes grados de antagonismo (B-74.2, SER-217, B-144 y PS-83), donde se evidencia la competencia por espacio y la supresión del crecimiento radial de la bacteria fitopatógena en comparación con el testigo.



**Figura 2.** Porcentaje de inhibición *in vitro* del crecimiento radial de *Ralstonia solanacearum* por aislamientos bacterianos nativos. Las barras representan el promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que, si bien los suelos bananeros del Caribe costarricense albergan una alta diversidad microbiana, solo una fracción de los aislamientos bacterianos evaluados presenta actividad antagonista frente a *Ralstonia solanacearum*. La exclusión inicial de aislamientos sin efecto inhibitorio resalta la necesidad de procesos de selección rigurosos en estudios de bioprospección, ya que la sola procedencia rizosférica o de suelos con historial de Moko no garantiza actividad biocontroladora.

La amplia variabilidad observada en los porcentajes de inhibición, que oscilaron entre valores bajos y efectos superiores al 50 %, sugiere diferencias funcionales marcadas entre los aislamientos, posiblemente asociadas a la producción diferencial de metabolitos antimicrobianos, competencia por nutrientes o mecanismos de exclusión espacial. Este patrón coincide con reportes previos en sistemas tropicales, donde únicamente un subconjunto reducido de la microbiota del suelo exhibe un antagonismo efectivo frente a patógenos de importancia económica (Hasinu *et al.*, 2021; Molinari & Quintana, 2025).

Los aislamientos con mayor actividad antagonista, particularmente COR-CB-022, PDAC4 y BQ42, generaron halos de inhibición amplios y estables, lo que sugiere un efecto antibiótico sostenido. La posterior identificación molecular de las cepas destacadas como pertenecientes al género *Bacillus* concuerda con la literatura, que reconoce a este grupo como uno de los principales agentes bacterianos utilizados en el control biológico de marchiteces bacterianas, debido a su capacidad para producir lipopéptidos antimicrobianos, sideróforos y enzimas hidrolíticas, así como por su elevada persistencia en el suelo y la rizósfera (Hasinu *et al.*, 2021).

La predominancia de *Bacillus* spp. entre los aislamientos más efectivos puede atribuirse a su alta adaptabilidad a condiciones de humedad elevada y variabilidad edáfica, características propias de las zonas bananeras del Caribe costarricense. Estas propiedades favorecen su establecimiento y supervivencia en el suelo, lo que representa una ventaja clave para su eventual aplicación en condiciones de campo.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la importancia de enfoques escalonados de selección *in vitro* como etapa preliminar en el desarrollo de estrategias de control biológico del Moko del banano. La validación de los aislamientos más promisorios bajo condiciones de campo, así como su integración con prácticas de manejo del suelo y enmiendas orgánicas, permitiría avanzar hacia esquemas de manejo integrado más sostenibles, orientados a la reducción de la presión de inóculo y a la restauración de la funcionalidad microbiana del agroecosistema bananero.

## CONCLUSIONES

Los suelos bananeros del Caribe costarricense constituyen una fuente importante de microorganismos bacterianos nativos con potencial para el control biológico de *Ralstonia solanacearum*, agente causal del Moko del banano. Si bien una proporción significativa de los aislamientos evaluados no presentó actividad antagonista, el proceso de selección permitió identificar un grupo reducido de cepas con efectos inhibitorios consistentes *in vitro*, destacándose COR-CB-022, PDAC4 y BQ42 por presentar los mayores porcentajes de inhibición. La identificación de estas cepas como pertenecientes al género *Bacillus* respalda su potencial aplicación en estrategias de manejo integrado del Moko, debido a su reconocida capacidad antagonista y adaptabilidad a condiciones tropicales. Se requieren estudios adicionales para la caracterización genómica profunda y para confirmar su eficacia en condiciones de planta y suelo, tanto de forma individual como en consorcios microbianos, con el fin de desarrollar alternativas biotecnológicas sostenibles para la industria bananera nacional.

## REFERENCIAS

- Belalcázar S. 2004. El Moko del banano y plátano: epidemiología y estrategias de manejo. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Colombia.
- Castañeda D and Espinosa J. 2005. Manejo integrado del Moko del banano (*Ralstonia solanacearum* raza 2). Revista Fitopatología Colombiana 29(2), 45–52.
- Chaves M, Rodríguez L and Vargas J. 2025. Situación actual del Moko del banano en Costa Rica y desafíos para su manejo sostenible. Revista de Ciencias Agrícolas 42(1), 15–27.
- Hasinu J, Kannan V and Subramanian P. 2021. Biological control of bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum* using native *Bacillus* spp. Biological Control 158, 104602. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104602>
- Laprea J and Saltos M. 2025. Bacteriophages as biocontrol agents against *Ralstonia solanacearum* in tropical crops. Phytopathology 115(3), 345–356.
- Molinari A and Quintana F. 2025. Antagonistic activity of soil microorganisms against bacterial and fungal pathogens in banana cropping systems. Journal of Applied Microbiology 128(4), 1120–1132.
- Ojeda L. 2023. Evaluación de microorganismos nativos para el control biológico del Moko del banano (*Ralstonia solanacearum* raza 2). Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Ramírez P, González R and Herrera M. 2020. Antagonistic bacteria and bacteriophages for the control of *Ralstonia solanacearum* in tropical crops. Plant Disease 104(6), 1645–1653. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-19-1734-RE>
- Valencia J. 2014. Enfermedades bacterianas del banano y plátano en América Latina. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- Ramírez M, Neuman B and Ramírez CA. 2020. Bacteriophages as promising agents for the biological control of Moko disease (*Ralstonia solanacearum*) of banana. Biological Control 104238.
- Valencia M. 2014. Epidemiología y control de *Ralstonia solanacearum* raza 2 en musáceas. ICA, Colombia.

## Etiological agents of crown rot disease in Cavendish bananas in Colombia

Gloria Marcela Perez-Ochoa<sup>1</sup>, Laura Arango-Palacio<sup>1</sup>, Juliana López-Jiménez<sup>2</sup>, Lilliana María Hoyos-Carvajal<sup>3</sup>, Sebastián Zapata-Henao<sup>1</sup>, Andrés Mauricio Pinzón-Núñez<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Centro de investigaciones del Banano CENIBANANO-AUGURA, Carepa, 057850, Colombia. <sup>2</sup>Centro Nacional de Secuenciación Genómica, CNSG, Universidad de Antioquia, Medellín, 050022, Colombia. <sup>3</sup>Universidad Nacional de Colombia, campus Medellín, 050022, Colombia. <sup>4</sup>Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Grupo Agrobiotecnología. Universidad de Antioquia, Medellín, 050022, Colombia

\*Autor de correspondencia:  
Andrés Mauricio Pinzón-Núñez  
andres.pinzonn@udea.edu.com

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

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

**Cita:**  
Perez-Ochoa GM, Arango-Palacio L, López-Jiménez J, Hoyos-Carvajal LM, Zapata-Henao S, Pinzón-Núñez AM. 2026. Etiological agents of crown rot disease in Cavendish bananas in Colombia. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 124 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26124>

### ABSTRACT

Crown rot is a major postharvest disease affecting Colombian bananas exported to Europe. Its etiology involves a complex of fungi influenced by geography and climate, yet the causal agents in Urabá, Colombia's main Cavendish banana export region, remain unclear. We collected and characterized 95 fungal isolates from diseased crowns using classical taxonomy and whole genome sequencing. The most frequent genus was *Fusarium* (65.3%), followed by *Clonostachys* (14.7%), *Colletotrichum* (11.6%), and others at lower frequencies. Only *Fusarium musae* and *Colletotrichum* sp. reproduced crown rot symptoms and fulfilled Koch's postulates. *Colletotrichum* sp. caused more severe infections, while *F. musae* showed slower growth. This is the first confirmed report of banana crown rot etiology in Colombia.

**Keywords:** Postharvest diseases, *Fusarium*, *Colletotrichum*, Cavendish, Banana

### RESUMEN

La pudrición de corona es una de las principales enfermedades postcosecha que afecta los bananos exportados desde Colombia hacia Europa. Su etiología involucra un complejo de hongos influenciado por condiciones geográficas y climáticas; sin embargo, los agentes causales en Urabá, principal zona exportadora de banano Cavendish, no se conocen con precisión. En este estudio se colectaron y caracterizaron 95 aislamientos fúngicos mediante taxonomía clásica y secuenciación genómica. El género más frecuente fue *Fusarium* (65,3 %), seguido de *Clonostachys* (14,7 %), *Colletotrichum* (11,6 %) y otros en menor proporción. Solo *Fusarium musae* y *Colletotrichum* sp. reprodujeron los síntomas y cumplieron los postulados de Koch. Este constituye el primer reporte confirmado de los agentes causales de la pudrición de corona en Colombia.

**Palabras clave:** Postcosecha, *Fusarium*, *Colletotrichum*, Cavendish, Banano



## INTRODUCTION

Bananas are one of Colombia's most important export products, ranking third after coffee and flowers, which makes them vital to the country's economy (AUGURA 2025). Currently, 52,753 hectares are dedicated to banana cultivation, with 32,883 hectares located in the Urabá region of Antioquia, the country's primary banana-exporting area. In 2024, the average productivity was 2,073 boxes per hectare, resulting in a total value of \$1026,4 million, with 109,9 million boxes exported (AUGURA 2025). The criteria for defining banana quality include appearance, aroma, taste, safety, and shelf life. Consequently, failing to meet these standards can result in market restrictions, a decrease in overall product volume, or a drop-in value. As a result, fruit losses can happen during harvesting, packing, transportation, storage, and marketing, with losses for bananas ranging from 20% to 80% of production (Yahia *et al.*, 2019). Most quality defects encountered by fruits exported to European and American markets during the winter season arise from post-harvest diseases, particularly crown rot. This condition is caused by a complex of fungi that not only impacts the fruit's appearance and quality but also shortens the shelf life of the bunches. In severe cases, the fingers of the fruit may even detach from the crown (De Melo *et al.*, 2016). However, the population of microorganisms associated with crown rot varies according to the climatic conditions and geographical location of the farm (Ewane *et al.*, 2013). The objective of this study was to identify and characterize the causal agents of crown rot in Cavendish bananas (AAA) in the Urabá region of Colombia. This marks the first report of the microorganisms responsible for this disease in the country.

## MATERIALS AND METHODS

### Sampling, pathogen isolation, and morphological characterization

Sample collection was conducted in four commercial Cavendish banana plantations (*Musa* AAA) of the Urabá subregion in the department of Antioquia, Colombia. A total of 40 clusters of 11-week-old Cavendish bananas were sampled at two locations in the packinghouse: fruit reception area and the wash tank. Afterward, the fruit was placed in a humid chamber at 25 °C with 12 hours of darkness to promote the sporulation of microorganisms in the crowns. The fungi were isolated from 1 cm<sup>2</sup> segments of crowns, following the disinfection methodology described by Abd-Alla *et al.* (2014). The isolates were incubated at a temperature of 25 °C for six days. After this period, colonies with similar morphology were selected and purified on PDA with Streptomycin. The taxonomic characterization of the isolates was conducted using classical taxonomic methods, achieving genus-level identification where possible, in accordance with the approaches described by Seifert *et al.* (2011).

### **Pathogenicity tests**

At 8 days of age, isolates were collected, and sterile distilled water was added. Scraping was then performed using a Drigalski we adjusted the concentration of each strain to  $5 \times 10^5$  conidia/ml. Finally, these two individual suspensions were combined to create a final inoculum with a concentration of  $1 \times 10^6$  conidia/ml. Next, 200  $\mu$ l of this suspension was transferred using a micropipette and inoculated onto the two lateral faces and the top of the crowns for each of the isolates. The fruit was then placed in a humidity chamber within polyethylene bags to create optimal humidity and temperature conditions for fungal growth. The banana clusters were maintained at a temperature of 16 °C with 12 hours of light, and disease symptoms were monitored every 72 hours. The development of symptoms was observed and recorded up to 8 days after inoculation to monitor lesion development. Once the first symptoms of crown rot appeared, we re-isolated the inoculated clusters by taking 1 cm x 1 cm segments. These segments were then placed on Petri dishes containing PDA for further analysis, to fulfill *Koch's* third and fourth postulates.

### **DNA extraction and data sequencing**

Isolation of total genomic DNA from fungal cultures was performed with the Qiagen DNeasy PowerLyzer PowerSoil Kit, following the manufacturer's recommendations. DNA integrity was evaluated by agarose gel electrophoresis, and its concentration was quantified by light absorption at 260nm using the NanoDrop™ 2000-Thermo Scientific™ and the Picogreen fluorescent method. The NGS sequencing experiment was performed on an Illumina NovaSeq instrument reading 150 paired-end reads. Raw reads were filtered using the CUTADAPT software v2.10, Genomic assembly was performed with SPADES assembler v3.14.1 (Bankevich *et al.*, 2012), using default parameters.

### **Phylogenetic Analysis and Comparative Visualization**

For robust phylogenetic reconstruction, sets of single-copy orthologous proteins were identified and extracted from the *de novo* assembled genomes of *Fusarium musae* (CEN02) and *Colletotrichum* sp. (CEN01). High-quality multiple sequence alignments were generated using MAFFT v7.490 (Katoh and Standley, 2013), incorporating homologous protein sequences retrieved from publicly available fungal genome databases for both genera to maximize taxon sampling and improve phylogenetic resolution. Phylogenetic inference was performed with IQ-TREE2 v2.1.3 (Nguyen *et al.*, 2015) using the maximum-likelihood method and 5,000 ultrafast bootstrap (UFB) replicates to ensure robust branch support.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Isolation and morphological identification

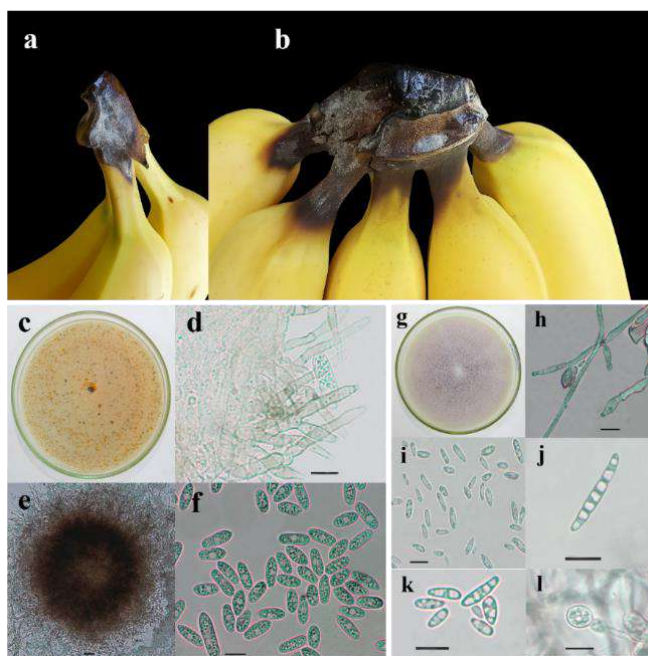
The genera isolated from Cavendish banana crowns exhibiting characteristic disease symptoms were identified with the following frequencies: *Fusarium* (65.3%) was the most prevalent, followed by *Clonostachys* (14.7%), *Colletotrichum* (11.6%), *Curvularia* (3.2%), *Penicillium* (3.2%), *Pestalotia* (1.1%), and a fungus from the order Mucorales (1.1%). *Fusarium* was the most frequently isolated genus at both locations, accounting for 42.86% of samples from the barcadilla and 17.14% from the wash tank. *Clonostachys* was most found in the barcadilla location, with a frequency of 8.57%. Isolates of *Colletotrichum* were noted in 5.71% of samples taken from the wash tank. Furthermore, *Curvularia* and *Penicillium* were exclusively found in the barcadilla, each with a frequency of 2.86%. *Pestalotia* was solely isolated from the wash tank, at a frequency of 0.95%.

### Pathogenicity tests

The study found that isolates from the genera *Clonostachys*, *Penicillium*, and Mucorales were not pathogenic to the crowns of Cavendish bananas. In contrast, *Colletotrichum* sp. and *Fusarium musae* were identified as the most pathogenic (Figure 1). *Colletotrichum* sp. and *Fusarium musae* were able to reproduce the typical symptoms of crown rot. *Colletotrichum* sp. had shorter incubation periods (4 to 5 days) and latency periods (4 to 7 days), as well as larger lesions, measuring 11 to 14.6 cm. In comparison, *Fusarium musae* exhibited longer incubation periods (4 to 12 days) and latency periods (9 to 15 days), with smaller lesions measuring 1 to 11 cm. Both *Fusarium musae* and *Colletotrichum* sp. isolates satisfied Koch's postulates.

### Phylogenetic Placement and Genomic Comparison of the *Colletotrichum* Isolate Associated with Crown Rot in Cavendish Bananas

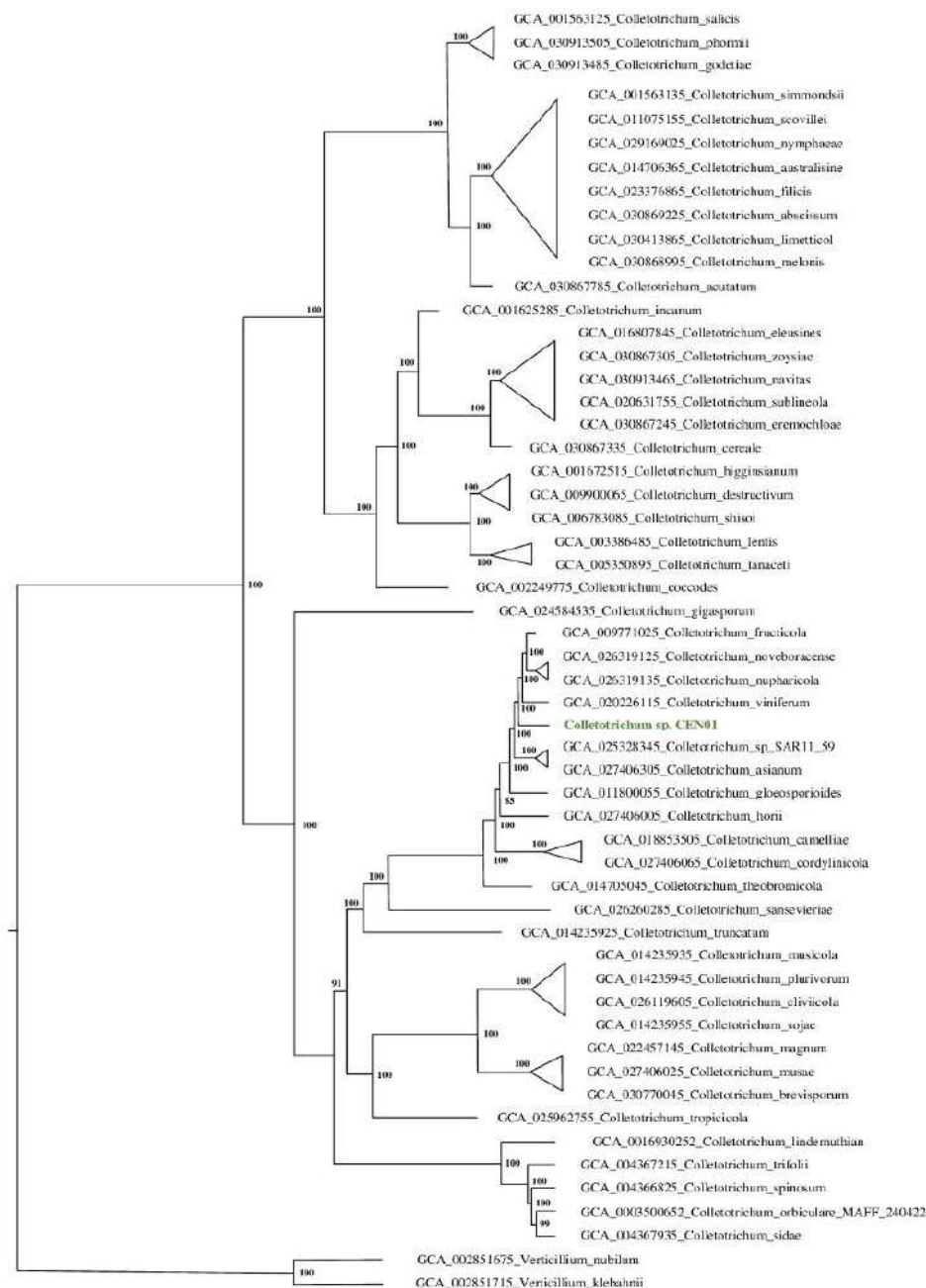
Phylogenomic analyses based on 2,620 single-copy orthologous proteins robustly positioned the Colombian isolate *Colletotrichum* sp. CEN01 within the *C. gloeosporioides* species complex (CGSC) (Figure 2). The isolate clustered with *C. viniferum*, *C. asianum*, and other members of the *C. gloeosporioides* species complex (CGSC), forming a well-defined monophyletic clade within the complex. Despite this clear placement, CEN01 could not be definitively assigned to any currently described *Colletotrichum* species, suggesting it may represent a novel and as-yet uncharacterized lineage currently absent from publicly available genomic databases.



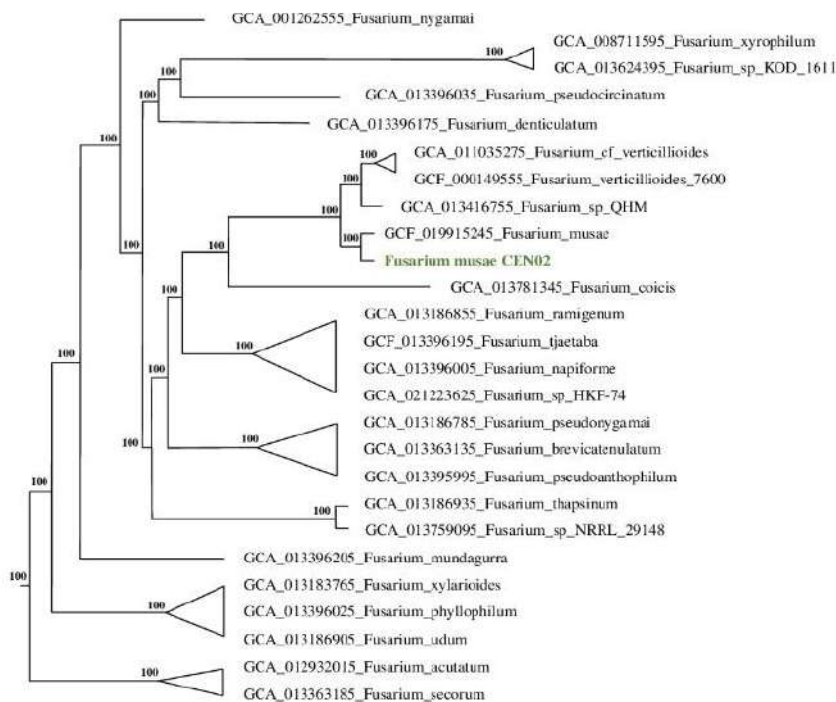
**Figure 1.** Crown rot symptoms in banana fruit and morphological characteristics of *Colletotrichum* sp., and *Fusarium musae*; (a and b) Crowns diseased with a superficial mycelium; (c - f) *Colletotrichum* sp.; (c) Colony on PDA after 8 days of incubation; (d) Setae; (e) Acervulus; (f) Conidia; (g - l) *Fusarium musae*; (g) Colony on PDA after 8 days of incubation; (h) Conidiophores with conidia; (i) Microconidia; (j and k) Macroconidia; (l) Chlamydospores. Bar = 10 µm in c, d, f, g, h, i, j, k, and l and bar = 50 µm in e.

### Phylogenetic placement of *Fusarium musae* isolate associated with crown rot in Cavendish bananas

A phylogenomic analysis based on 220 single-copy orthologous proteins placed the Colombian isolate *Fusarium musae* CEN02 within the *F. musae* clade, supported by maximal branch support values (Figure 3). The isolate clustered tightly with the reference genome of *F. musae* (GCF\_019915245), confirming its identity as this banana-associated pathogen. The strong branch support values underscore the robustness of this placement and highlight the genetic distinctiveness of *F. musae* relative to closely related taxa, such as *F. verticillioides* and *F. napiforme*. These findings validate *F. musae* CEN02 as a causal agent of crown rot disease in Cavendish bananas in Colombia and provide a genomic reference for comparative studies on pathogenicity and host specificity within the *Fusarium fujikuroi* species complex (FFSC).



**Figure 2.** Phylogenetic tree showing relationships of the isolate *Colletotrichum* sp. CEN01 within the *C. gloeosporioides* species complex (CGSC). High-quality multiple sequence alignments were generated using MAFFT v7.490. Phylogenetic inference was performed with IQ-TREE2 v2.1.3 using the maximum-likelihood method and 5,000 ultrafast bootstrap (UFB) replicates to ensure robust branch support.



**Figure 3.** Phylogenetic tree showing relationships of the isolate *Fusarium musae* CEN02 within the *F. musae* clade, supported by maximal branch support values. High-quality multiple sequence alignments were generated using MAFFT v7.490. Phylogenetic inference was performed with IQ-TREE2 v2.1.3 using the maximum-likelihood method and 5,000 ultrafast bootstrap (UFB) replicates to ensure robust branch support.

## CONCLUSIONS

This study provides the first genomic confirmation of *Fusarium musae* as a causal agent of crown rot disease in Colombia's Uraba region, a strategic center for Cavendish banana production and export. While *F. musae* has previously been reported from Latin America, the Canary Islands, and the Philippines (Kamel *et al.*, 2016), these identifications were largely based on morphological traits or limited multilocus sequencing approaches. Our comprehensive phylogenomic analyses unequivocally place isolate CEN02 within the *F. musae* clade, extending the known distribution of this pathogen and emphasizing its epidemiological significance in Latin America. The availability of a high-quality genome assembly for CEN02 provides an essential resource for comparative genomics, population-level studies, and molecular diagnostics, strengthening postharvest disease management strategies and safeguarding the phytosanitary status of Colombian banana exports.

## REFERENCIAS

- Abd-Alla MA, El-Gamal NG, El-Mougy NS and Abdel-Kader MM. 2014. Post-harvest treatments for controlling crown rot disease of Williams banana fruits (*Musa acuminata* L.) in Egypt. *Journal of Fungal Biology-ISSN,2229*, 2217.
- AUGURA. 2025. Coyuntura Económica 2024: análisis del mercado del banano.
- Bankevich A, Nurk S, Antipov D, Gurevich AA, Dvorkin M, Kulikov AS, Lesin VM, Nikolenko SI, Pham S, Prjibelski AD, Pyshkin AV, Sirotkin AV, Vyahhi N, Tesler G, Alekseyev MA and Pevzner PA. 2012. SPAdes: A New Genome Assembly Algorithm and Its Applications to Single-Cell Sequencing. *Journal of Computational Biology*, 19(5), 455–477.
- De Melo MP, da Silva Matos K, Júnior JE, Moreira SI, Silva FF, de Alcântara Neto F, Pereira OL. 2016. *Thielaviopsis musarum* causes postharvest crown and fruit rot of banana in Northeastern Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 1-6.
- Ewane CA, Lassois L, Brostaux Y, Lepoivre P ad de Lapeyre de Bellaire L. 2013. The susceptibility of bananas to crown rot disease is influenced by geographical and seasonal effects. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 35(1), 27-36.
- Kamel MAM, Cortesi P, Saracchi M. 2016. Etiological agents of crown rot of organic bananas in Dominican Republic. *Postharvest Biology and Technology*, 120, 112-120.
- Katoh K and Standley DM. 2013. MAFFT Multiple Sequence Alignment Software Version 7: Improvements in Performance and Usability. *Molecular Biology and Evolution*, 30(4), 772–780.
- Nguyen LT, Schmidt HA, Von Haeseler A and Minh BQ. 2015. IQ-TREE: A Fast and Effective Stochastic Algorithm for Estimating Maximum-Likelihood Phylogenies. *Molecular Biology and Evolution*, 32(1), 268–274.
- Seifert K, Morgan-Jones G, Gams W and Kendrick B. 2011. The genera of Hyphomycetes (p. 997). Utrecht: CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre.
- Elhadi MY, Fonseca JM, Kitinoja L. 2019. Chapter 2 - Postharvest Losses and Waste. *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*, Woodhead Publishing, Pages 43-69.

## Estrategias alternativas para el control de la pudrición suave del fruto: antagonismo y modificaciones al embolse

José Pablo Vargas-Fernández<sup>1\*</sup>, Edgar Valverde<sup>2</sup>, Amy Wang-Wong<sup>3</sup>, Miguel Muñoz-Fonseca<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Agronomía. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. <sup>2</sup>Corporación Bananera Nacional, La Rita, Pococí, Costa Rica. <sup>3</sup>Universidad de Costa Rica. Escuela de Agronomía. Centro de Investigaciones en Protección de Cultivos. San José, Costa Rica. <sup>4</sup>Standard Fruit Company de Costa Rica, Depto. de Investigación y Desarrollo, Río Frío, Sarapiquí, Costa Rica

\*Autor de correspondencia:  
José Pablo Vargas-Fernández  
josepablo.vargasfernandez@uc  
r.ac.cr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**  
Vargas-Fernández JP, Valverde E, Wang-Wong A, Muñoz-Fonseca M. 2026. Estrategias alternativas para el control de la pudrición suave del fruto: antagonismo y modificaciones al embolse. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 125 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26125>

### RESUMEN

La Pudrición Suave del Fruto (PSF), causada por *Dickeya chrysanthemi*, es una enfermedad importante en banano, responsable de pérdidas económicas por deterioro y descarte de fruta. Su mayor incidencia ocurre en proyectos de renovación y depende de factores climáticos, prácticas culturales e insectos vectores. Tradicionalmente se ha manejado mediante medidas sanitarias y químicas, aunque con limitaciones económicas y ambientales. Este estudio evaluó estrategias alternativas basadas en microorganismos antagonistas y modificaciones al embolse del racimo para reducir la PSF. Se probaron dos formulaciones comerciales (*Bacillus subtilis* QST 713, Serenade®; y *Bacillus pumilus* QST 2808, Sonata®), aplicadas en distintas estructuras de la planta, y combinaciones de tipo y cierre de embolse. Los ensayos se realizaron en plantaciones comerciales de *Musa* AAA (cv. Gran Enano) en Río Frío, Guápiles y Valle de la Estrella (Costa Rica), durante periodos de baja y alta precipitación. En el periodo de baja precipitación, ambos biocontroladores redujeron significativamente la incidencia de la enfermedad, alcanzando disminuciones de hasta 68 %, especialmente cuando se aplicaron sobre la inflorescencia. En el periodo de alta precipitación, la reducción alcanzó hasta 82 %. Las modificaciones del embolse, como cierres temporales o doble embolse, redujeron la PSF hasta en 90 % durante el periodo de baja precipitación, aunque su eficacia disminuyó en condiciones de alta humedad. En conclusión, la integración de biocontroladores y prácticas culturales adaptadas al clima representa una alternativa sostenible y efectiva para el manejo de la PSF en banano.

**Palabras clave:** *Dickeya chrysanthemi*, Prácticas agronómicas, *Bacillus* spp., Control biológico

### ABSTRACT

Alternative strategies for the control of soft fruit rot: antagonism and bagging modifications. Soft Fruit Rot (SFR), caused by *Dickeya chrysanthemi*, is an important banana disease responsible for economic losses due to fruit decay and rejection. Its highest incidence occurs in plantation renovation projects and is influenced by climatic factors, cultural practices, and insect vectors. Traditionally, it has been managed through sanitary and chemical measures, although these present economic and environmental limitations. This study evaluated alternative strategies based on antagonistic microorganisms and modifications to bunch bagging to reduce SFR incidence. Two commercial formulations (*Bacillus subtilis* QST 713, Serenade®; and *Bacillus pumilus* QST 2808, Sonata®) were tested, applied to different plant structures, along with combinations of bagging type and closure duration. The trials were



conducted in commercial plantations of *Musa* AAA (cv. Gran Enano) in Río Frío, Guápiles, and Valle de la Estrella (Costa Rica), during periods of low and high rainfall. During the low-rainfall period, both biocontrol agents significantly reduced disease incidence, achieving decreases of up to 68%, particularly when applied to the inflorescence. In the high-rainfall period, reductions reached up to 82%. Bagging modifications, such as temporary closures or double bagging, reduced SFR incidence by up to 90% during the dry period, although their effectiveness decreased under high humidity conditions. In conclusion, the integration of microbial biocontrol agents and climate-adapted cultural practices represents a sustainable and effective alternative for the management of SFR in banana.

**Keywords:** *Dickeya chrysanthemi*, Agriculture practices, *Bacillus* spp., Biological control

## INTRODUCCIÓN

La Pudrición Suave del Fruto (PSF) es una enfermedad que deteriora la calidad del banano antes y después de la cosecha y causa pérdidas económicas significativas. El agente causal principal es *Dickeya chrysanthemi*, con participación de *Pectobacterium carotovorum*. Esta enfermedad se presenta con mayor frecuencia en plantaciones nuevas, donde la inversión inicial es alta, y provoca el descarte preventivo de fruta sana por la posibilidad de contaminación cruzada con exudados de frutos infectados (Vargas *et al.*, 2022). La incidencia de la PSF está influenciada por condiciones climáticas, prácticas culturales como la desflora (Guzmán *et al.*, 2017), la posible actividad de insectos vectores (Corby *et al.*, 2007) y la presencia de inóculo bacteriano en el campo. *D. chrysanthemi* es un habitante común de las plantaciones, capaz de sobrevivir en estigmas florales y en residuos de cosecha (Guzmán & Wang, 1998). Por ello, el periodo que inicia con el embolse y la manipulación de la inflorescencia, unas doce semanas críticas, constituye una ventana determinante para prevenir la enfermedad.

Las estrategias tradicionales de control, basadas en medidas sanitarias y culturales como la eliminación de residuos, la desinfección de herramientas y la prevención de lesiones durante la desflora (Martínez *et al.*, 2000), presentan limitaciones por su costo, complejidad y posibles efectos ambientales, por ello, se requieren alternativas complementarias. El embolse, práctica clave en la producción bananera, puede adaptarse para reducir el contacto del fruto con patógenos o sus vectores. Dado que *D. chrysanthemi* puede ser transmitida por insectos, estrategias como el doble embolse o el cierre temporal de la bolsa podrían disminuir la incidencia de PSF. Asimismo, los microorganismos antagonistas *Bacillus subtilis*, *B. pumilus* y *Pseudomonas fluorescens* constituyen una opción biológica prometedora para el control de *D. chrysanthemi* (Vargas *et al.*, 2022).

El objetivo de este estudio fue evaluar la efectividad de dos formulaciones comerciales de microorganismos antagonistas, aplicadas en distintas estructuras de la planta y a la banda de fertilización, junto con modificaciones en el embolse del racimo, como estrategias para reducir la incidencia de la PSF.

## MATERIALES Y MÉTODOS

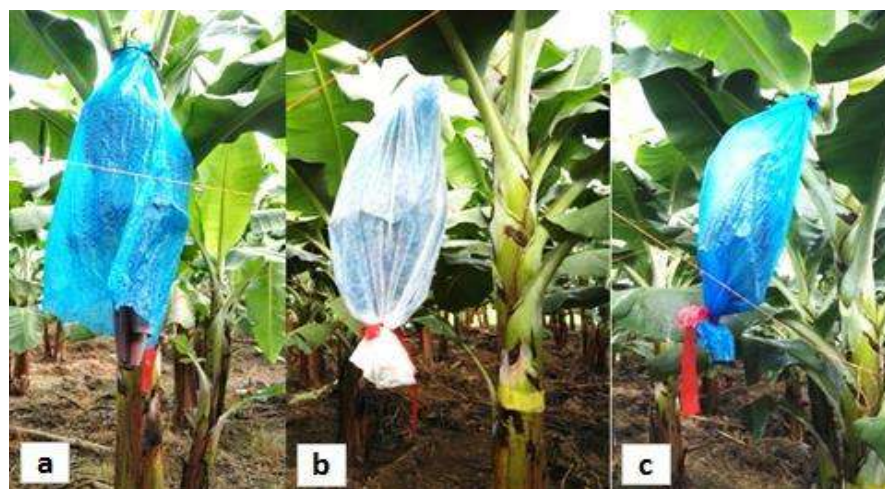
Este trabajo se dividió en dos ensayos, la evaluación de la efectividad de formulaciones comerciales de microorganismos antagonistas (Ensayo I) y las modificaciones al embolse (Ensayo II). Ambos se llevaron a cabo en dos periodos: de semana 7 a 18 ( $\leq 100$  mm/semana) y de semana 25 a 40 ( $\geq 100$  mm/semana), en plantaciones renovadas de banano (*Musa* AAA, cv Gran Enano) de la empresa Standard Fruit Company de Costa Rica S.A. (Dole), ubicadas en Río Frío (Sarapiquí), Guápiles (Pococi) y Valle de la Estrella (Talamanca). Se trabajó con plantas en fase reproductiva o próximas a la emisión de la inflorescencia (“parición”). En ambos ensayos no se efectuaron inoculaciones artificiales de *D. chrysanthemi*; se aprovechó el inóculo natural presente en los lotes de renovación, donde la incidencia de la enfermedad era elevada.

En el Ensayo I, se evaluaron tres tratamientos en campo: un testigo sin aplicación (T1), Serenade® (T2) con *Bacillus subtilis* cepa QST 713 a  $1 \text{ L ha}^{-1}$  ( $1.0 \times 10^{11}$  UFC  $\text{ml}^{-1}$ ), y Sonata® (T3) con *Bacillus pumilus* cepa QST 2808 a  $1 \text{ L ha}^{-1}$  ( $1.0 \times 10^{11}$  UFC  $\text{ml}^{-1}$ ) de acuerdo con los resultados obtenidos por Vargas et al. (2022). En la inflorescencia, las formulaciones se aplicaron una vez con bomba de espalda Carpi® (boquilla 8002) después de la desflora y antes de bajar la bolsa, asperjando 0,1 L por inflorescencia sobre las manos. En la planta, la aplicación cubrió el pseudotallo, punto de inserción foliar y hojas, y la banda de fertilización, utilizando bomba de motor Solo® con un volumen total de 7 L por bloque (Figura 1). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones. Cada unidad experimental correspondió a una parcela de  $625 \text{ m}^2$  ( $25 \times 25 \text{ m}$ ), con una parcela útil de  $400 \text{ m}^2$  y 80 plantas, bajo una densidad de  $1524 \text{ plantas ha}^{-1}$ . Entre parcelas se dispusieron dos hileras de borde para evitar la deriva de tratamientos.



**Figura 1.** Aplicación de formulaciones comerciales de microorganismos antagonistas para el control de la Pudrición Suave del Fruto (PSF). a) aplicación dirigida a la inflorescencia. b) aplicación dirigida a la planta y banda de fertilización.

En el Ensayo II, se evaluaron once tratamientos que combinaron tipo de bolsa y momento de desflora (Figura 2). El diseño experimental fue completamente al azar, con cuarenta repeticiones por tratamiento. Las plantas se distribuyeron aleatoriamente en parcelas de aproximadamente una hectárea, identificándose individualmente según número, repetición y tratamiento. En ambos ensayos, la incidencia de la Pudrición Suave del Fruto (PSF) se evaluó doce semanas después de aplicar los tratamientos, al cosechar los racimos de fruta en edad comercial. En cada racimo se contabilizaron los frutos enfermos para determinar la incidencia de la PSF (% PSF), y a partir de esta estimar la pérdida comercializable (% Merma), considerando los 4 frutos adyacentes al fruto podrido, 1 fruto a cada lado y 2 en la parte inferior de la mano por contaminación con exudados, según la fórmula [% Merma = % PSF + (4 × % PSF)].



**Figura 2.** Modificaciones a la práctica de embolsado. a) Tratamiento testigo, embolsado comercial abierto con bolsa de polietileno azul de alta densidad (HDPE). b) Doble embolsado con bolsa de polietileno azul de alta densidad y embolsado agríban con bolsa blanca de tela de polipropileno (Agriban®). c. Embolsado comercial cerrado con bolsa de polietileno azul de alta densidad (HDPE).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el periodo de baja precipitación, la aplicación de *Bacillus pumilus* (Sonata®) y *Bacillus subtilis* (Serenade®) redujo la incidencia de la PSF en ambas localidades, aunque con distinta magnitud (Cuadro 2). En Río Frío y Valle de la Estrella, las aplicaciones dirigidas a la inflorescencia fueron las más efectivas, especialmente con *B. pumilus*, que logró disminuir la PSF entre 65 y 68 % respecto al testigo. En contraste, los tratamientos aplicados a la planta y la banda de fertilización mostraron reducciones menores, lo que sugiere que el sitio de aplicación influye en la colonización y persistencia del agente biológico aplicado. Estos resultados coinciden con Guzmán y Wang (1998), quienes atribuyen la dinámica de colonización bacteriana a las condiciones microambientales del tejido y su exposición al inóculo del patógeno.

Durante el periodo de alta precipitación, la eficacia de ambos biocontroladores se mantuvo o incluso aumentó, reduciendo hasta 82 % respecto al testigo. Tanto *B. pumilus* como *B. subtilis* mostraron buen desempeño, aunque con variaciones según el sitio de aplicación. Las aplicaciones a la inflorescencia lograron las mayores reducciones, posiblemente porque la humedad elevada favoreció no solo el desarrollo del patógeno, sino también el establecimiento de las bacterias benéficas, que ejercieron mecanismos de competencia y antibiosis. Esto concuerda con Morikawa (2006) y Beauregard *et al.* (2013), quienes destacaron la capacidad de *Bacillus* spp. para formar

biocapas protectoras y producir compuestos antimicrobianos en condiciones húmedas. Además, las diferencias observadas entre tratamientos pueden atribuirse a los mecanismos de acción específicos: *B. subtilis* produce lipopéptidos cíclicos que alteran las membranas bacterianas e interfieren en el “quórum sensing” de *Erwinia chrysanthemi*, mientras que *B. pumilus* genera aminoazúcares y biofilms que bloquean la colonización del patógeno (Morikawa 2006).

**Cuadro 2.** Efecto de dos biocontroladores *Bacillus pumilus* (Sonata®) y *Bacillus subtilis* (Serenade®) en el % Merma por Pudrición Suave del Fruto (PSF) en función de la forma de aplicación y la época de precipitación en Río Frío y Valle de la Estrella.

		Baja precipitación		Alta precipitación	
		Inflorescencia	Planta y banda de fertilización	Inflorescencia	Planta y banda de fertilización
<b>RF</b>	T1 Testigo	2,85*	1,90	3,80	2,20
	T2 <i>B. pumilus</i>	1,40	1,25	0,70	1,00
	T3 <i>B. subtilis</i>	2,40	1,25	0,90	1,15
<b>VE</b>	T1 Testigo	3,30	1,05	2,70	1,65
	T2 <i>B. pumilus</i>	1,15	0,45	1,60	0,50
	T3 <i>B. subtilis</i>	2,10	0,30	1,10	0,70

RF: Río Frío. VE: Valle de la Estrella. \*% merma por PSF.

Durante el periodo de baja precipitación, las modificaciones al embolse redujeron la incidencia de la PSF en las fincas evaluadas. En Río Frío, el cierre temporal del embolse sin desflora fue la estrategia más efectiva, evidenciando la importancia del aislamiento físico para impedir el ingreso de vectores como dípteros y otros insectos asociados a la transmisión de *Erwinia chrysanthemi*. De manera similar, en Valle de la Estrella, los tratamientos con cierre prolongado del embolse (hasta 12 semanas) disminuyeron la incidencia en más del 90 %, lo que confirma que el cierre del HDPE actúa como una barrera eficiente para el control del patógeno, coincidiendo con lo reportado por Barrera *et al.* (2008), quienes destacaron el papel del embolse cerrado en la protección del racimo frente a agentes infecciosos externos.

No obstante, durante la época de alta precipitación, la efectividad de estas modificaciones se redujo notablemente. En Guápiles, los tratamientos con embolse cerrado o doble embolse presentaron incidencias elevadas de PSF, probablemente debido al aumento de la humedad y la temperatura dentro del racimo, condiciones que favorecen la proliferación y dispersión de *Erwinia* spp. (Guzmán y Wang 1998). Así, mientras el embolse cerrado o doble embolse puede funcionar como una estrategia cultural eficaz en periodos secos, en ambientes húmedos podría generar un microclima favorable para el patógeno. Por ello, se recomienda ajustar su implementación a las

condiciones climáticas locales e integrarla dentro de un manejo cultural adaptativo que considere la interacción entre el hospedero, el patógeno y los factores ambientales que determinan la incidencia de la PSF.

**Cuadro 3.** Efecto de las modificaciones en el embolse y la desflora en el % Merma por Pudrición Suave del Fruto (PSF) en tres localidades bajo condiciones contrastantes de precipitación

	Baja precipitación		Alta precipitación
	RF	VE	G
T1 EmbCom abierto + desflora	2,83*	2.00	2.30
T2 EmbCom abierto - desflora	0,90	ND	ND
T3 EmbAgrib abierto + desflora	1,60	ND	ND
T4 EmbAgrib C 2 sem - desflora	0.40	ND	ND
T5 EmbCom C 2 sem + desflora	1.90	0.90	1.50
T6 EmbAgrib C 2 sem + desflora	ND	0.40	4.00
T7 EmbCom C 2 sem - desflora	0.80	ND	ND
T8 EmbCom C 4 sem + desflora	ND	1.45	4.10
T9 EmbAgrib C 4 sem + desflora	ND	0.50	2.40
T10 EmbCom C 12 sem + desflora	ND	0.25	2.20
T11 EmbAgrib C 12 sem + desflora	ND	0.50	2.00

\*% merma por PSF. EmbCom: embolse comercial con bolsa de polietileno azul de alta densidad (HDPE). & EmbAgrib: embolse agriban con bolsa blanca de tela de polipropileno (Agriban®). C: número de semanas que se cerró la bolsa. RF: Río Frío. VE: Valle de la Estrella. G: Guápiles. ND: No hay datos disponibles.

## CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que el manejo de la Pudrición Suave del Fruto (PSF) debe ajustarse a las condiciones climáticas de cada época del año para garantizar su efectividad. Durante la época seca, las aplicaciones dirigidas a la inflorescencia de las formulaciones de *Bacillus subtilis* (Serenade®) y *Bacillus pumilus* (Sonata®), acompañadas de modificaciones al embolse que limiten el ingreso de vectores, como el cierre temporal del embolse o la implementación de un doble embolse, mostraron una reducción en la incidencia de la enfermedad. Estas prácticas representan alternativas viables y sostenibles que pueden ser fácilmente incorporadas al manejo preventivo del cultivo bajo condiciones de menor humedad. Por el contrario, en la época lluviosa, el aumento de la humedad relativa y la temperatura dentro del embolse favorecieron el desarrollo del patógeno y disminuyeron la eficacia de estas mismas estrategias.

## REFERENCIAS

- Barrera J, Carolina D, José O. 2008. Contribución del desmane y embolse del racimo a la producción y calidad del plátano Hartón. *Agronomía (Manizales)* 15(1): 39-44.
- Beauregard P, Chai Y, Vlamakis H, Losick R, Kolter R. 2013. *Bacillus subtilis* biofilm induction by plant polysaccharides. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (17): 1621-1630.
- Corby V, Pontaroli A, Shimkets L, Bennetzen J, Habel K, Promislow D. 2007. Geographical distribution and diversity of bacteria associated with natural populations of *Drosophila melanogaster*. *Applied and Environmental Microbiology* 73(11): 3470-3479.
- Guzmán M, Wang A. 1998. Descripción de los síntomas, identificación del agente causal y determinación de la fuente de inóculo de la pudrición suave del dedo en banano (*Musa AAA*). *CORBANA* 23(50):109-124
- Guzmán M, Villalta R, Martínez I. 2017. Relación entre la desflora en el campo del racimo de banano (*Musa AAA*, cv. Grande Naine) y la pudrición bacteriana suave del dedo. *CORBANA* 37-43(63):47-61,
- Martínez I, Villalta R, Guzmán M. 2000. Plegable divulgativo N°. 2: Pudrición suave del dedo de banano (*Pectobacterium carotovorum* Waldee). Costa Rica, Corporación Bananera Nacional. 2 p.
- Morikawa M. 2006. Beneficial biofilm formation by industrial bacteria *Bacillus subtilis* and related species. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101(1): 1-8.
- Vargas Fernández JP. 2022. Identification of banana soft rot associated microorganisms and *in vitro* evaluation of microbiological and chemical control alternatives. *Agronomía Costarricense*, 46(2), 45–58. <https://doi.org/10.15517/rac.v46i2.52046>

## Uso de bioherbicidas como alternativa al glifosato para el control de maleza en banano

Mario Orozco-Santos<sup>1\*</sup>, Karina de la Paz García-Mariscal<sup>1</sup>, Alejandra Berenice Castrejón-Méndez<sup>2</sup>, Luis Eduardo Iglesias-Velasco<sup>2</sup> y Marcela Rubí Rodríguez-Gutiérrez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CE Tecomán-CIRPAC-INIFAP, <sup>2</sup>Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias-Universidad de Colima

\*Autor de correspondencia:  
Mario Orozco-Santos  
orozco.mario@inifap.gob.mx

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fitosanidad

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

**Cita:**  
Orozco-Santos M, García-Mariscal K, Castrejón-Méndez AB, Iglesias-Velasco LE y Rodríguez-Gutiérrez MR. 2026. Uso de bioherbicidas como alternativa al glifosato para el control de maleza en banano. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 126 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26126>



### RESUMEN

La maleza representa un serio problema en plantaciones de banano. Su control está basado en métodos manuales, mecánicos y químicos. En banano, el herbicida más utilizado desde hace varias décadas ha sido el glifosato. El presente trabajo consistió en la evaluación de diferentes compuestos orgánicos, coadyuvantes para mejorar su eficacia y momento óptimo de su aplicación. Los bioherbicidas evaluados son elaborados a base de extractos de plantas, aceite de coco, resina de pino, toxinas de *Puccinia* spp. y/o ácidos orgánicos. El mejor control de arvenses se logró con el bioherbicida BH2 (Gordolobo, aceite de coco, resina de pino, *Puccinia* spp. y papaína) aplicado al 1.0 % a los 15 días de emerger la maleza, registrando un 87 % de eficacia. Su control fue estadísticamente similar al glifosato, el cual controló el 89 % de arvenses. La edad de la maleza al momento de la aplicación, influyó en el grado de control. El BH2 a razón de 0.5 y 0.75 %, aplicado a los 7-9 días de emergida la maleza tuvo una efectividad biológica del 94 %. El BH2 se mejoró al mezclarlo con sulfato de amonio (al 1.0 %), registrando un 93 % de control, resultando estadísticamente similar al obtenido con el glifosato (98 %). Estos resultados demuestran que el BH2 puede ser una alternativa viable para el control de malas hierbas en banano, aplicado en las primeras etapas de desarrollo de la maleza. Su costo económico es superior al de los herbicidas tradicionales (glifosato y glufosinato de amonio); sin embargo, los beneficios ambientales, en salud humana y sostenibilidad tienen mayor valor que el económico.

**Palabras clave:** *Musa* AAA, Malas hierbas, Control orgánico, Bioherbicidas

### ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate different organic compounds, the use of adjuvants to improve their effectiveness and the optimal timing of their application in banana crop. The best weed control was achieved with the bioherbicide BH2 ("gordolobo" (*Verbascum thapsus*), coconut oil, pine resin, *Puccinia* spp., and papain) at 1.0% applied 15 days after weed emergence, registering 87% efficacy. Its control was statistically similar to glyphosate, which controlled 89% of weeds. The age of the weed at the time of bioherbicide application influenced the control efficacy. This organic compound, applied at a rate of 0.5% to 0.75%, 7-9 and 14-16 days after weed emergence, had a biological effectiveness of 94 and 72%, respectively. While, when it was applied after 21 days, its degree of control was reduced to 21% or less. BH2 applied at 14 days (at a dose of 0.5%) and mixed with ammonium sulfate (at 1.0%), it recorded 93% control, resulting in a statistically similar result to that obtained with glyphosate (98%). Finally, the bioherbicide, when applied without adjuvant, only recorded 51% control. These results demonstrate that BH2 can be a viable alternative for weed control in banana crop when applied in the early stages of weed development. Its economic cost is higher than that the traditional herbicides (glyphosate and glufosinate ammonium); however, the environmental, human health, and sustainability benefits outweigh the economic benefits.

**Keywords:** *Musa* AAA, Weeds, Organic control, Bioherbicides

## INTRODUCCIÓN

Para el año 2024, en México se cultivaron 87,394 hectáreas de musáceas en las regiones tropicales de la costa del Golfo de México y Océano Pacífico (SIAP, 2023). Los principales estados productores son Chiapas, Veracruz, Tabasco, Colima, Michoacán, Oaxaca, Guerrero, Jalisco, Puebla y Nayarit. El banano (*Musa* spp.) se cultiva bajo condiciones de temporal o riego en áreas del trópico húmedo, subhúmedo y trópico seco. La maleza representa un serio problema por las condiciones favorables de humedad durante todo el año, lo cual favorece su germinación, crecimiento y fructificación de diferentes especies. Su control está basado en métodos químicos, manuales y mecánicos (Rodríguez *et al.*, 2021). En este frutal, el herbicida más utilizado desde hace varias décadas ha sido el glifosato (Ramírez y Rodríguez, 1996; Quintero Pertuz *et al.*, 2021). Sin embargo, existen otras alternativas químicas como el glufosinato de amonio y el paraquat, los cuales han demostrado una buena eficacia en el control de la maleza en el cultivo de banano (Rodríguez *et al.*, 2021). Existen algunos reportes exitosos del uso de bioherbicidas para el control de maleza, los cuales contienen extractos de plantas (aleloquímicos o aceites esenciales), fitotoxinas microbiales, micoherbicidas, bacterias, virus, entre otros (Duke *et al.*, 2022; Roberts *et al.*, 2022). En los últimos años, el glifosato ha sido cuestionado por sus posibles efectos negativos en la salud humana y por ocasionar resistencia en algunas especies de maleza. En la búsqueda de alternativas orgánicas y opciones de manejo sostenible en el control de malezas, se ha reportado la efectividad de algunos bioherbicidas en el control de malas hierbas en el cultivo de banano (Orozco-Santos y García-mariscal, 2024). El presente trabajo tuvo los siguientes objetivos: 1) evaluar la efectividad biológica de cuatro bioherbicidas (elaborados con compuestos orgánicos) y 2) evaluar el efecto de dosis de bioherbicidas en mezcla con un coadyuvante comercial o con sulfato de amonio para el control de malezas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en las instalaciones del Campo Experimental Tecomán (INIFAP), localizado en el municipio de Tecomán, Colima, México. El suelo del lote experimental es arcillo-arenoso y se ubica a 18°58'8" latitud N y 103°50'42" longitud O y una altura de 62 m s. n. m. El estudio constó de tres experimentos:

**Bioherbicidas.** Se evaluaron cuatro bioherbicidas comerciales: BH1 (Ácidos orgánicos enzimáticos, extracto de plantas silvestres alelopáticas y toxinas de *Puccinia* spp.), BH2 (Gordolobo, aceite de coco, resina de pino, *Puccinia* spp. y papaína), BH3 (Aceite de conífera, extracto de *Datura stramonium*, extracto de plantas alelopáticas y metabolitos de *Puccinia* spp.), BH4 [Bioherbicida base jabón con extractos vegetales

alelopáticos y ácidos orgánicos (vinagre)] y se compararon con el herbicida glifosato (3.6 g de i.a./L) y un testigo sin aplicación. Los bioherbicidas y el glifosato se aplicaron en una concentración del 1 % y se le adicionó un coadyuvante (alcohol graso etoxilado y polidimetilsiloxano) en dosis de 1 mL/L. Se realizó una aplicación a los 15 días de edad de las malezas.

**Bioherbicidas, dosis y coadyuvantes.** Se evaluaron tres dosis del bioherbicida BH5 (Aceite de conífera, extracto de *Datura stramonium*, extracto de plantas alelopáticas, metabolitos de *Puccinia* spp. y aceite de coco no hidrogenado) en comparación con el bioherbicida BH2 y el glifosato. Con la finalidad de mejorar la eficacia de los bioherbicidas, ambos productos se compararon en mezcla con un coadyuvante comercial a base de alcohol graso etoxilado y polidimetilsiloxano y con el fertilizante sulfato de amonio. También se realizó una aplicación a los 30 días de edad de las malezas.

**Momento de aplicación.** Para este experimento, se utilizaron bolsas negras de polietileno (50 X 60 cm), conteniendo 50 kg de suelo procedente de una parcela infestada con malezas de hoja ancha y angosta para garantizar una población abundante de malas hierbas. Las bolsas fueron regadas tres veces por semana para inducir la emergencia de maleza. Se evaluó el bioherbicida BH2 en concentración de 0.75 % en comparación al glifosato (3.6 g de i.a./L) y un testigo sin control. La unidad experimental fue el área de la bolsa con suelo (0.196 m<sup>2</sup>). Los tratamientos (bioherbicida y glifosato) se aplicaron en cuatro momentos diferentes de acuerdo a la edad de la maleza: 7-9, 14-16, 21-23 y 28-30 días. A todos los tratamientos se les agregó sulfato de amonio al 1 %.

En los tres experimentos, se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. En los primeros dos experimentos, la unidad experimental consistió de parcelas de 4 x 4 m (16 m<sup>2</sup>). Los bioherbicidas y el glifosato fueron aplicados con una bomba de mochila manual con boquilla de cerámica tipo abanico 110-8003. Antes de establecer el trabajo, se realizó un muestreo para determinar las especies de maleza presente. A los 21 después de la aplicación, se realizó una evaluación visual del porcentaje de control de maleza presente en cada tratamiento. Se utilizó la escala porcentual 0 a 100 %, en donde 0 significa que no hubo ningún efecto en el control de la maleza y 100 que fueron completamente eliminadas (Carmona *et al.*, 2001). También se determinó la biomasa total (peso en verde) al término del experimento. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Bioherbicidas:** Las especies de arvenses registradas fueron: *Paspalum Dilatatum*, *Eleusine indica*, *Cynodon Dactylon*, *Malvastrum coromandelianum*, *Camonea umbellata*, *Distimake dissectus*, *Portulaca oleracea* y *Priva lappulacea*. El control de malezas con los bioherbicidas y la cantidad de biomasa fresca a los 21 días después de la aplicación se observa en el Cuadro 1. El mejor control de arvenses se logró con el bioherbicida BH2, registrando un 87.3 % de eficacia. Su control fue estadísticamente similar al glifosato, el cual tuvo un 88.7 % de abatimiento de la maleza. Le siguió en efectividad el bioherbicida BH1 con un 75.2 % de control. Los bioherbicidas BH3 y BH4 registraron un control medio con un 65.8 y 63.3 % de efectividad, respectivamente. Los resultados de control de malezas fueron directamente proporcionales a la cantidad de biomasa presente en los tratamientos. A mayor control de maleza se tuvo menor biomasa verde. El bioherbicida BH2 y el herbicida glifosato presentaron la menor cantidad de peso fresco (83 y 86 g/m<sup>2</sup>), seguido por BH1 (120 g), BH3 (408 g) y BH4 (493 g). El tratamiento testigo tuvo un total de 703 g/m<sup>2</sup>.

**Bioherbicidas, dosis y coadyuvantes.** Las malezas presentes en este experimento fueron: *Cynodon dactylon*, *Echinochloa colonum*, *Synedrella nodiflora*, *Digitaria sanguinalis*, *Ixophorus unisetus*, *Malvastrum coromandelianum*, *Boerhavia erecta*, *Sorghum halapense* y *Urochloa* sp. A los 21 días de la aplicación, el mejor control de malezas se logró con el herbicida glifosato en mezcla con sulfato de amonio, registrando en promedio un 96.5 % de eficacia (Cuadro 2). En cambio, el bioherbicida BH5 a razón de 1.0 y 1.5 % en mezcla con el coadyuvante (3 ml/L) y aplicado a los 30 días de edad de las malezas, tuvieron un control deficiente con un 46.3 y 53.8 % de eficacia, respectivamente. Al incrementar la concentración del BH5 al 2.0 %, se mejoró el control de maleza, registrando un 83.8 %. Sin embargo, al bajar la concentración del BH5 al 1.0 % y mezclarlo con sulfato de amonio (15 g/L) se tuvo un control similar a la dosis más alta de este bioherbicida (2.0 %) en mezcla con el coadyuvante comercial. Este tratamiento mostró un 77.5 % de control. De igual manera, el herbicida BH2 a razón del 1.0 % y mezclado con sulfato de amonio registró una eficacia de 73.8%. La cantidad de biomasa vegetal fresca a los 21 días de la aplicación se redujo significativamente con el tratamiento de glifosato, registrando un total de 150 g/m<sup>2</sup>. Los bioherbicidas BH5 y BH2 aplicados al 1.0 % en mezcla con sulfato de amonio tuvieron una cantidad de biomasa verde similar a la dosis alta del BH5. El tratamiento testigo sin control tuvo 1,130 g/m<sup>2</sup>.

**Cuadro 1.** Efecto de la aplicación de bioherbicidas en el control de malezas y acumulación de biomasa a los 21 días después de la aplicación.

Tratamientos (Dosis)	Control de maleza (%)	Biomasa fresca (g/m <sup>2</sup> )
BH1 (10 ml/L)	75.2 ab	120 a
BH2 (10 ml/L)	87.3 a	86 a
BH3 (10 ml/L)	65.8 b	408 b
BH4 (10 ml/L)	63.3 b	493 b
Glifosato ((3.6 g de i.a./L)	88.7 a	83 a
Testigo	0.0 c	703 c

Separación de medias según la Prueba de Tukey al 99 % de probabilidad.

**Cuadro 2.** Efecto de la aplicación del bioherbicida BH5 en el control de maleza y acumulación de biomasa a los 21 días después de la aplicación.

Tratamientos (Bioherbicida + concentración + coadyuvante o sulfato de amonio) <sup>z</sup>	Control de maleza (%)	Biomasa verde (g/m <sup>2</sup> )
BH5 (1.0%) + Coadyuvante (3 ml/L)	46.3 c	579 c
BH5 (1.5%) + Coadyuvante (3 ml/L)	53.8 c	468 c
BH5 (2.0%) + Coadyuvante (3 ml/L)	83.8 b	312 b
BH5 (1.0%) + Sulfato de amonio (15 g/L)	77.5 b	354
BH2 (1.0%) + Sulfato de amonio (15 g/L)	73.8 b	344
Glifosato (1.0%) + Sulfato de amonio (15 g/L)	96.5 a	150 a
Testigo	0.0 d	1,130 d

<sup>z</sup> La aplicación de los tratamientos se realizó a los 30 días de edad de las malezas.

Separación de medias según la Prueba de Tukey al 99 % de probabilidad.

**Momento de aplicación.** Las especies de maleza presente fueron: *Euphorbia heterophylla*, *Kallstroemia grandiflora*, *Trianthema portulacastrum*, *Malvastrum coromandelianum*, *Tridax procumbens*, *Euphorbia hyssopifolia*, *Cynodon dactylon*, y *Rottboellia cochinchinensis*. El control de malezas con el bioherbicida BH2 y el glifosato a los 7 días después de la aplicación se observa en el Cuadro 3. La aplicación del bioherbicida BH2 (0.75 %) y el herbicida glifosato a los 7-9 días de edad de la maleza tuvieron un excelente control de malezas. El BH2 registró un 94 % de control, mientras que el glifosato tuvo un 100 % de efectividad. La eficacia del bioherbicida se redujo cuando se aplicó a los 14-16 días de edad, logrando un 72 % de control. A los 21-23 días de edad, el grado de eficacia fue de 21 % y a los 28-30 días tuvo un 32 % de control. El herbicida glifosato resultó eficaz cuando se aplicó a los 14-16 días y su efectividad se redujo en las siguientes fechas de aplicación (21-23 y 28-30 días de edad de la maleza), registrando de 82 a 85 % de control.

**Cuadro 3.** Efecto de la aplicación del bioherbicida BH2 en el control de maleza de acuerdo a su momento de aplicación.

Tratamientos (Concentración)	Edad de la maleza	Control (%) <sup>z</sup>	Maleza viva (No/m <sup>2</sup> ) <sup>z</sup>	Biomasa (g/m <sup>2</sup> ) <sup>y</sup>
BH2 (0.75 %)	7-9 días	94 a	60 ab	1,017 c
Glifosato		100 a	0 a	840 bc
BH2 (0.75 %)	14-16 días	72 c	366 d	914 c
Glifosato		96 a	37 a	457 b
BH2 (0.75 %)	21-23 días	21 c	717 e	625 b
Glifosato		85 ab	448 d	933 c
BH2 (0.75 %)	28-30 días	32 d	764 e	533 b
Glifosato		82 b	112 b	75 a
Testigo	-	0 e	1,325 f	2,174 d

<sup>z</sup> La evaluación de control de maleza se realizó a los 7 días después de la aplicación de los tratamientos.

<sup>y</sup> La evaluación se realizó al final del experimento.

Separación de medias en la misma columna según la prueba de Tukey al 95 % de probabilidad.

En el presente estudio, del total de bioherbicidas evaluados, el BH2 aplicado a los 15 días de edad de la maleza proporcionó el mejor control de malezas. Su eficacia resultó similar al herbicida glifosato. Por otra parte, los bioherbicidas BH2 Y BH5 aplicados a los 30 días de edad de la maleza, en una concentración del 1.0 % y en mezcla con sulfato de amonio, registraron una eficacia del 73.8 % y 77.5 %, respectivamente. En cambio el glifosato tuvo un 96.5 % de control. Estos resultados demuestran la importancia del momento de aplicación de los bioherbicidas. Al igual que en estudios previos, el BH2 aplicado a los 7-9 días de emergidas las malezas, tuvo un control similar que el glifosato. El BH2 tuvo un 94 % de control, mientras que el glifosato un 100 %.

## CONCLUSIONES

Los bioherbicidas a base de extractos vegetales, aceite de coco, resina de pino, *Puccinia* spp. y papaína pueden ser una alternativa viable para el control de malas hierbas cuando se aplica en las primeras etapas de desarrollo de la maleza (7 a 9 días de edad). La efectividad de los bioherbicidas se mejora significativamente cuando se mezcla con sulfato de amonio (1.5 %) con relación al uso tradicional de coadyuvantes comerciales.

Estos resultados demuestran que el BH2 puede ser una alternativa viable para el control de malas hierbas en banano, aplicado en las primeras etapas de desarrollo de la maleza. Su costo económico es superior al de los herbicidas tradicionales (glifosato y

glufosinato de amonio); sin embargo, los beneficios ambientales, en salud humana y sostenibilidad tienen mayor valor que el económico.

## REFERENCIAS

- Carmona R, Sayão CANB y Carvalho PR. 2001. Controle de *Acacia farnesiana* e de *Mimosa pteridofita* em pastagem. *Pesqui Agropecu Bras* 36:1301-1307.
- Duke SO, Pan Z, Bajsa-Hirschel J, Boyette CD. 2022. The potential future roles of natural compounds and microbial bioherbicides in weed management in crops. *Advances in Weed Science* 40 (Spec1):e020210054.
- Orozco-Santos M y García-Mariscal KP. 2024. Evaluación de alternativas químicas y orgánicas al herbicida glifosato para el control de maleza en el cultivo de banano. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 1(1):527-533. <https://doi.org/10.62498.ARTC.2467>
- Ramírez SG y Rodríguez CJC. 1996. Manual de producción de plátano para Tabasco y Norte de Chiapas. Folleto técnico No. 13. SARH, INIFAP, CIRGOC, Campo Experimental Huimanguillo. 82 p.
- Roberts J, Florentine S, Fernando WGD, Tennakoon KU. 2022. Achievements, developments and future challenges in the field of bioherbicides for weed control: A global review. *Plants*, 11, 2242. <https://doi.org/10.3390/>
- Rodriguez DSL, Borém A and Vilela RMG. (Editores técnicos). 2021. *Banana: do Plantio à colheita*. Livro. EPAMIG. Belo Horizonte, Brasil. 376 p.

## Securing the future of Cavendish through precision gene editing

Daniel Ponndorf<sup>1</sup>, Graham McGrann<sup>1</sup>, Cristina Pignocchi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Tropic Bioscience Ltd, Norwich Research Park, Innovation Centre, United Kingdom, NR47GJ

\*Autor de correspondencia:  
Cristina Pignocchi  
cristina.pignocchi@tropic.bio

Contribución:  
Artículo Científico

Sección:  
Biotecnología y Ómicas

Recibido:  
15 diciembre, 2025

Publicado:  
30 abril, 2026

Cita:  
Ponndorf D, McGrann G,  
Pignocchi C. 2026. Securing  
the future of Cavendish through  
precision gene editing. *Acorbat  
Revista de Tecnología y  
Ciencia* 3(1): 127  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26127>

### ABSTRACT

Tropic is committed to revolutionize the future of Cavendish by combating the two existential threats of the banana industry (Panama Disease - TR4 and Black Sigatoka - BSD) and by significantly reducing yield losses. Tropic, founded in the UK in 2016, and comprised of over 150 business and technology professionals, is using cutting-edge technologies to produce improved gene-edited non-GMO elite Cavendish varieties. After the successful development of the first reduced-browning and extended-shelf-life varieties in 2025, we are advancing the development of our disease resistant varieties. From our large screen trials we have successfully identified the target genes responsible for conferring resistance to Panama disease (TR4) and Black Sigatoka (BSD) and we have developed non-transgenic lines that show promising resistance in field trials.

**Keywords:** Cavendish, TR4, BSD, Genome-editing

### RESUMEN

Tropic está comprometida con revolucionar el futuro del banano Cavendish enfrentando las dos amenazas existenciales de la industria bananera: *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza 4 tropical (TR4) y la Sigatoka Negra (SN), y reduciendo significativamente las pérdidas de rendimiento. Fundada en el Reino Unido en 2016, Tropic cuenta con más de 150 profesionales en negocios y tecnología que emplean herramientas de vanguardia para desarrollar variedades élite de Cavendish editadas genéticamente (no transgénicas). Tras el desarrollo exitoso, en 2025, de las primeras líneas con menor pardeamiento y mayor vida útil, la empresa avanza en variedades resistentes a TR4 y SN. Los ensayos a gran escala han identificado genes diana responsables de la resistencia y líneas no transgénicas con resultados prometedores en campo.

**Palabras clave:** Cavendish, Resistencia, TR4, Sigatoka Negra, Edición del genoma



## INTRODUCTION

Banana is the most traded tropical and subtropical fruit with 19 million tonnes of global export volume in 2022 (FAO, 2023) and the fourth most important staple crop. Global banana exports declined from 22.5 million tonnes in 2019 to 19.1 million tonnes in 2022 (FAO, 2023). Increased production costs of banana is one contributing factor to this trend which is partially driven by the increasing cost for disease prevention measurements (FAO, 2023). About 10-25% of banana production cost is spent to control black sigatoka, or black leaf streak disease (BSD) (*Mycosphaerella fijiensis*), which can lead to 50% yield losses if untreated (Noar *et al.*, 2022). The main control for BSD is the application of fungicides which can be required at a rate of up to 70 applications per year and decreasing sensitivity to the commonly applied fungicides is an increasing concern (Noar *et al.*, 2022).

In addition, the presence and spread of tropical race 4 (TR4, *fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) further puts financial pressure on the banana industry (FAO, 2023). Even though strict control measures are in place, the recent reports of TR4 emergence in Colombia in 2019 (Garcia-Bastidas *et al.*, 2019), Peru in 2022 (Acuna *et al.*, 2022) and Venezuela in 2023 (Herrera *et al.*, 2023) show that these measures only slow down the spread, rather than prevent it.

Moreover, in the industry, it is estimated that between 10 and 15% of production loss is seen through premature ripening in the business chain. Premature ripening of fruit is also observed in plants generally infected with Black Sigatoka disease. The opportunity of extending shelf-life by delaying or slowing ripening offers a myriad of opportunities to growers and the entire business chain. Currently no known breeders are working on extended shelf-life products for bananas.

The triploid nature and sterility of Cavendish makes breeding attempts highly inefficient and the propagation of Cavendish is limited to *in vitro* culture.

At Tropic (Norwich UK), we apply genome editing (GE) using the CRISPR/CAS technology in a non-GMO manner to develop bananas with improved traits and the first lines with reduced browning and extended shelf-life developed by Tropic are now exempt from GMO regulations in Honduras, the Philippines, Costa Rica and US.

Here we summarise the findings of our disease resistance screening trials and provide an overview on our extended shelf-life variety and the development of new varieties resistant to TR4 and BSD.

## MATERIAL AND METHODS

### Transformation of Grand Naine embryogenic cell suspension and plant regeneration

To generate genome edited plants, plasmids containing Cas9 and sgRNAs (guide RNA) were designed to edit endogenous banana sequences. Banana ECS cultures were generated from immature male flowers (Cote *et al.*, 1996) and transformed by cocultivation with *Agrobacterium tumefaciens* (Khanna *et al.*, 2004). Plantlets were regenerated and propagated as described by Tripathi *et al.* (2012). Two to four months after collection, the shoots were sampled for DNA analysis. Clonal propagation was initiated by exposing the meristem to propagation medium. Plants were refreshed on new media every 4 weeks until pathology and field trials were initiated.

### Genotyping of regenerated events

Individual plant lines representing independent editing events were analysed for presence or absence of Cas9 using qPCR with specific primers and for the presence of the edits in the respective target gene or genes by sanger-sequencing. Only edited plants were analysed in pathology assays and field trials.

### TR4 pathology assay

TR4 pathology assays were carried out as described by García-Bastidas *et al.* (2019). In brief: *in vitro* plants were grown in soil for 7 weeks and inoculated with 200 ml of 1E6 conidia/ml on 8-6-2023, monitored weekly and scored 6-10 weeks after inoculation depending on disease progression. Disease severity was determined by image analysis with ImageJ (ImageJ, vs. 1.52). Data was analysed in GenStat v23 using linear mixed modelling of repeated measures.

### BSD field trials

Genome edited Grand Naine plants were grown for 13 weeks in the nursery and moved to field trials alongside industry standard Cavendish (BSD susceptible) and FHIA-25 (BSD resistant) plants in a randomized block design. In each trial a minimum of six clones of each edited line was tested with a single clone positioned randomly within each block at a density of 4444 plants per hectare. No fungicide treatments were applied for the duration of the trials. Trials were planted throughout the year. Disease pressure was assessed in each trial against BSD development on the susceptible Cavendish control variety. Four weeks after planting, different parameters were scored for 10 weeks: total leaves on the plant, oldest leaf clear of streaks (OLCS), oldest leaf clear of burns covering <5% (OLCB<5%) leaf area, oldest leaf clear of burns covering >5% (OLCB>5%) leaf area. In the cases of slower disease development on the

Cavendish controls in any trial during drier seasons, BSD evaluations were extended for additional scoring weeks. Data was analysed in GenStat v23 using linear mixed modelling of repeated measures.

### **Green life assay**

Plants genome edited to extend banana green life were prepared in the nursery or field transplanting as described for the BSD trials. Approximately 100 clones of the genome-edited lines were planted in plots of three plants across five randomized blocks at a density of 1550 plants per hectare. Each block also contained clones of an industry standard Cavendish variety. The trial was managed following standard commercial practices for disease control and plant husbandry. Fruit was harvested after 91 days hanging. Harvested clusters are treated with a commercial solution of Thiabendazole-Alum and packed into boxes as commercially practiced, prior to storage in a cold room at 71.6°F (22°C). Green life was manually assessed twice a day (morning and afternoon) for the presence of soft pulp. The presence of soft pulp was considered the end of green life and the number of days taken to reach this stage after entering the cold room noted. The analysis of green life was carried out on one hand per bunch for at least 15 bunches per plant line. Data was analysed in GenStat v23 using a general linear model.

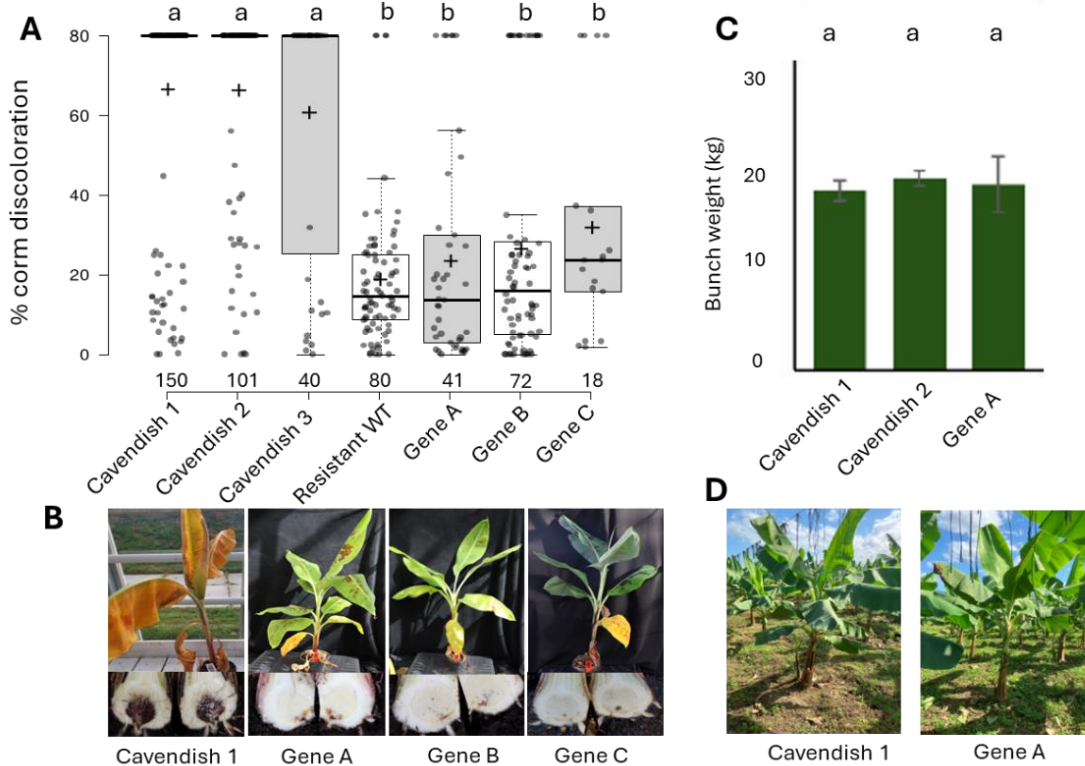
## **RESULTS AND DISCUSSION**

Over 50 *Musa acuminata* genes showing relevance for resistance to TR4 and BSD were edited and approx. 10,000 plants were screened in field trials and greenhouse. From these, we have identified 6 target genes that, when edited, confer disease resistance in greenhouse and/or field. We will summarise here the results of the screening and the disease performance of the selected lines in the field and in greenhouse trials. We will also demonstrate that our non-transgenic edited lines display strong resistance in bioassays.

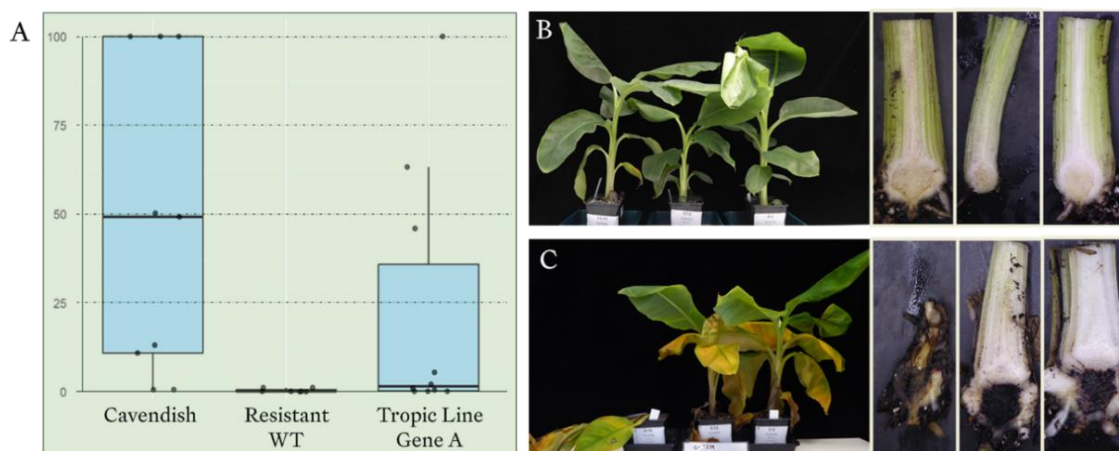
### **TR4 resistance screen of genome edited Grand Naine plants**

Over 600 independent experimental edited lines (total 502 individual plants) covering 31 different target genes were screened in the greenhouse for TR4 resistance. From these we were able to select 3 target genes that consistently correlated with strong TR4 resistance in greenhouse and field. Figure 1 shows the disease score in greenhouse bioassays of the lines edited in the three genes (Gene A, Gene B and Gene C) compared with the susceptible and resistant controls. The disease score is measured in % corm area showing typical discoloration caused by TR4 infection. Lines edited in the 3 target genes display TR4 resistance comparable to that of the resistant FHIA control. Trials

conducted in non-TR4 infested field demonstrated that disruption in any of the 3 genes does not negatively impact agronomic performance. In addition, we have generated several non-transgenic lines edited in the 3 genes of interest which showed significant resistance against the fungus in greenhouse under high inoculum pressure (Figure 2). These lines will be tested in field trials in different geographies throughout 2026.



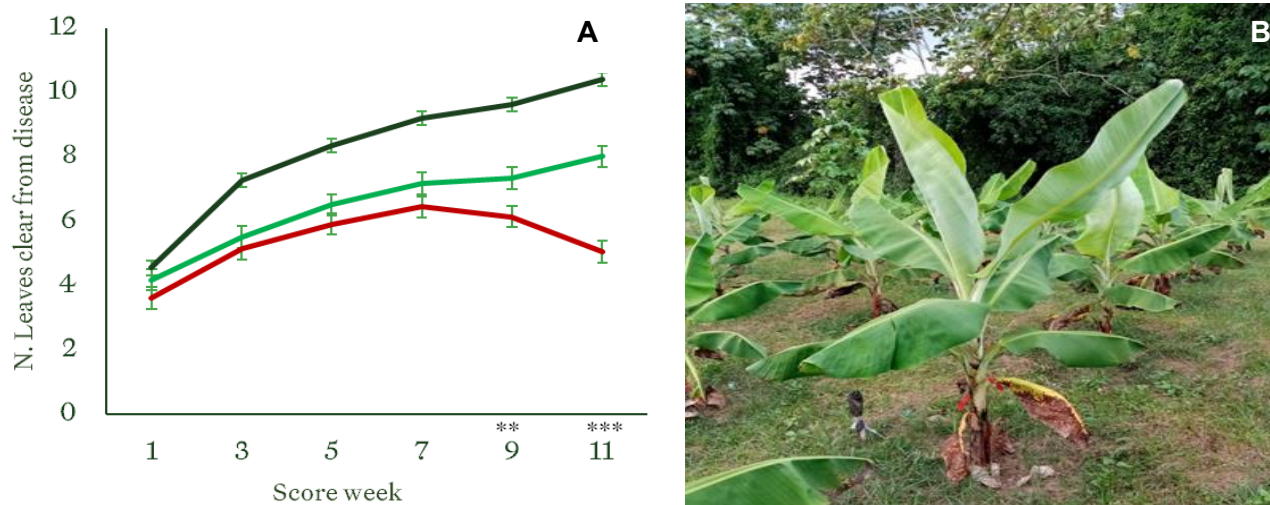
**Figure 1.** TR4 disease resistance and agronomic performance of the lines edited in the 3 top target genes. A: Assessment of corm discoloration in edited and control lines 6 weeks post-inoculation. The number under each graph indicate the number of plants scored. Lines edited in gene A, B and C show significantly increased resistance ( $p \leq 0.01$ ) compared to all susceptible cavendish lines. B: External and internal TR4 symptoms. C: Example of agronomic performance (measured as bunch weight in kg) associated with disruption of Gene A. D: Plants edited in the 3 genes are indistinguishable from conventional Cavendish in the field. A representative picture of plants edited in Gene A vs Industry standard Cavendish is shown here.



**Figure 2.** TR4 disease resistance in one of the edited non-transgenic lines. A: Assessment of corm discoloration in Tropic line and control lines 6 weeks post-inoculation. B: Tropic edited non-transgenic plants show no external or internal symptoms while Grand Naine controls ( C ) display visible symptoms of infection.

### **BSD resistance screen of genome edited Grand Naine plants**

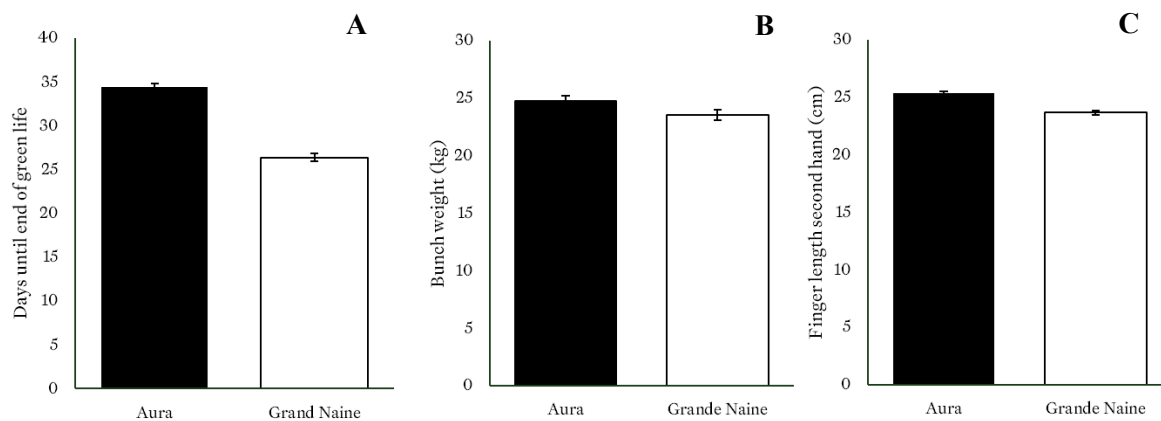
To identify Cavendish target genes able to confer resistance to BSD, approximately 800 independent edited lines covering 29 different target genes, individually and in combination, were screened in the field under different management regimes for BSD resistance. Each line represents a different editing event in a specific target gene or combination of target genes. Scoring was initiated 4 weeks after moving the plants to the fields and plants were typically scored for 10-11 weeks. The screening identified 13 independent lines (edited in 3 individual target genes) that showed significantly less BSD symptoms compared to the susceptible control with an average of 9 and 10 leaves clear of burns <5%. This value was comparable with the resistant FHIA-25 line (Example of resistance observed in lines edited in one of the three gene is displayed in Figure 3). The 3 top target genes have also been edited in combination and we have generated multiple non-transgenic lines from which we expect BSD resistance field data in early 2026.



**Figure 3.** BSD scoring data of top performing edited lines in BSD field trials 7 weeks after planting. **A.** Plants edited in one of the top target genes (light green) show significantly reduced BSD symptoms compared to Cavendish industry standard control (red) and are comparable to the resistant FHIA-25 line (dark green). \* indicates significant difference compared to Cavendish control. **B.** Editing of the target genes does not affect agronomic performance and plants are indistinguishable from Cavendish industry standard.

### Tropic Extended Green-life Variety

To extend the green life of banana fruit and reduce losses due to premature ripening, we have edited genes involved in the ethylene biosynthetic pathway. Our new edited non-transgenic variety (Aura) displays an extension of green-life of up to 12 days (Fig. 4A) and Cavendish commercial agronomic performance (Fig. 4B-C).



**Figure 4.** Performance of our new variety Aura vs conventional Cavendish Grande Naine. A: Days until the end of the green life. B: Bunch weight. C: Finger length.

## CONCLUSIONS

We have identified the genes responsible for conferring resistance to TR4 and BSD and we have developed multiple non-transgenic plant lines edited in those genes, which show resistance in greenhouse bioassays. We have also developed a new Cavendish variety with over 10 days extended green life.

Tropic's novel Cavendish varieties will effectively address the needs of the banana industry today and secure the future of the most loved fruit globally.

## REFERENCES

- Acuna R, Rouard M, Leiva AM, Marques C, Olortegui JA, Ureta C, Cabrera-Pintado RM, Rojas JC, Lopez-Alvarez D, Cenci A, Cuellar WJ, Dita M. 2022. First Report of *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* Tropical Race 4 Causing Fusarium Wilt in Cavendish Bananas in Peru. *Plant Disease* 106-8.
- Côte F, Domergue R, Monmarson S, Schwendiman J, Teisson C, Escalant JV. 1996. Embryogenic cell suspensions of the male flower of *Musa* AAA cv. Great Nain. *Plantarum Physiology* 97: 285-290
- FAO. 2023. Banana Market Review 2022. Rome. [www.fao.org/3/cc6952en/cc6952en.pdf](http://www.fao.org/3/cc6952en/cc6952en.pdf), accessed on 23/11/2023.
- García-Bastidas FA, van der Veen AJT, Nakasato-Tagami G, Meijer HJG, Rafael E, Arango- Noar RD, Thomas E, Daub ME. 2022. Genetic Characteristics and Metabolic Interactions between *Pseudocercospora fijiensis* and Banana: Progress toward Controlling Black Sigatoka. *Plants* 2022, 11, 948
- Herrera RM, Hernández Y, Magdama F, Mostert D, Bothma S, Paredes Salgado EM, Terán D, González E, Angulo R, Angel L, Rodríguez Y, Ortega R, Viljoen A, Marys EE. 2023. First Report of Fusarium Wilt of Cavendish Bananas Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 in Venezuela. *Plant Diseases* October 2023 3297
- Khanna H, Becker D, Kleidon Dale J. 2004. Centrifugation Assisted *Agrobacterium tumefaciens*-mediated Transformation (CAAT) of embryogenic cell suspensions of banana (*Musa* spp. Cavendish AAA and Lady finger AAB). *Molecular Breeding* 14, 239–252.
- Noar RD, Thomas E, Daub ME, 2022. Genetic Characteristics and Metabolic Interactions between *Pseudocercospora fijiensis* and Banana: Progress toward Controlling Black Sigatoka. *Plants* 2022, 11, 948.

## Diversidad genómica de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1 en Costa Rica

Gabriel Bogantes<sup>1\*</sup>, Nancy Chaves<sup>1</sup>, Rafael Segura<sup>1</sup>, César Rodríguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones de CORBANA, <sup>2</sup>Facultad de Microbiología & Centro de Investigaciones Tropicales, Universidad de Costa Rica

\*Autor de correspondencia:

Gabriel Bogantes  
gbogantes@corbana.co.cr

Contribución:

Artículo Científico

Sección:

Biotecnología y Ómicas

Recibido:

15 diciembre, 2025

Publicado:

30 abril, 2026

Cita:

Bogantes G, Chaves N, Segura R, Rodríguez C. 2026. Diversidad genómica de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1 en Costa Rica. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 128  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26128>

### RESUMEN

A pesar de que el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1 (Foc R1) ha sido históricamente responsable de la enfermedad de la marchitez en cultivares de banano tipo Gros Michel en la región y en Costa Rica, no existen reportes sobre la diversidad genómica de aislamientos recuperados en este país. Para llenar este vacío de conocimiento, se mapearon lecturas cortas de secuenciación de 16 aislamientos de FocR1 recolectados en Matina, Turrialba, Sixaola, Pérez Zeledón y Jiménez (Tucurrique) entre 2019 y 2021, y se mapearon al genoma de la cepa de referencia *F. oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical (Foc R4T; GCA\_031834405.1). Estos mapeos mostraron entre 49 y 379 polimorfismos de nucleótido único en su genoma central, lo que evidenció una baja variabilidad genética y la presencia ininterrumpida de un linaje clonal dominante que se ha expandido a todas las regiones representadas en el estudio. Este trabajo constituye la primera caracterización genómica de FocR1 en Costa Rica y proporciona una referencia para fortalecer los programas de diagnóstico molecular, la vigilancia fitosanitaria y la planificación de estrategias de manejo preventivo ante la posible introducción de nuevas razas del patógeno.

**Palabras clave:** Diversidad genética, Secuenciación genómica, Marchitez del banano

### ABSTRACT

Although *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Race 1 (Foc R1) has traditionally caused Fusarium wilt in Gros Michel banana cultivars in the region and in Costa Rica, there are no reports on the genomic diversity of isolates collected in the country. To address this gap, short sequencing reads from 16 Foc R1 isolates gathered between 2019 and 2021 from Matina, Turrialba, Sixaola, Pérez Zeledón, and Jiménez (Tucurrique) were mapped to the reference genome of *F. oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 (GCA\_031834405.1) to assess their variation. The genomes analyzed showed between 49 and 379 single-nucleotide polymorphisms (SNPs) in their core genome, indicating low genetic diversity and the continued presence of a dominant clonal lineage that has spread across all sampled regions. This study marks the first genomic characterization of Foc R1 in Costa Rica and provides a reference for improving molecular diagnostics, phytosanitary monitoring, and the development of preventive management strategies to mitigate the potential introduction of new pathogen races.

**Keywords:** Genetic diversity, Genomic sequencing, Fusarium wilt



## INTRODUCCIÓN

El hongo de suelo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1 (Foc) es el agente causal de la enfermedad conocida como “marchitez por *Fusarium*” del banano (Batlle y Pérez, 2009). Esta es una de las enfermedades más destructivas de este cultivo, ya que no existen métodos químicos de control eficaces una vez que el patógeno se establece en la plantación, y también debido a que sus estructuras de resistencia pueden permanecer viables en el suelo durante décadas, incluso en ausencia de plantas hospederas (Magdama *et al.*, 2020; Thangavelu *et al.*, 2024).

El complejo *F. oxysporum* f. sp. *cubense* presenta una gran diversidad genética y se clasifica en al menos 24 Grupos de Compatibilidad Vegetativa (VCGs) y cuatro razas patogénicas diferenciadas según su rango de hospedadores: Raza 1, Raza 2, Raza 3 y Raza 4 (Manzo-Sánchez *et al.*, 2017; Magdama *et al.*, 2020). Las razas se definen principalmente por su capacidad diferencial para infectar variedades de banano, más que por su divergencia genética per se (Ploetz, 2015), lo que refleja la complejidad taxonómica y epidemiológica del patógeno.

Durante las primeras décadas del siglo XX, la Raza 1 de Foc (Foc R1) devastó plantaciones de la variedad *Gros Michel*, lo que motivó su sustitución por el grupo de cultivares *Cavendish*, actualmente predominante en la industria bananera mundial (Maryani *et al.*, 2019). La Raza 4 Tropical (Foc R4T), hasta este momento no reportada en Costa Rica, circula en múltiples países de Latinoamérica, incluidos países cercanos geográficamente, como en Colombia y Venezuela. Esta raza, originaria del sudeste asiático, representa una seria amenaza para las plantaciones comerciales debido a su amplio rango de hospedadores, así como su alta capacidad de diseminación y virulencia (Vásquez, 2021).

Ante la amenaza potencial del ingreso de Foc R4T al país, resulta prioritario estudiar la epidemiología genómica de las poblaciones locales de Foc con el fin de sentar una línea base que permita reconstruir su dinámica de dispersión y diseñar estrategias racionales de vigilancia y manejo fitosanitario.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Secuenciación de ADN

Esta investigación se realizó con ADN extraído utilizando el método CTAB (Protocolo interno de CORBANA, 2022) a partir de 30 cepas identificadas previamente por técnicas moleculares como *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1 y que fueron

depositadas en la colección de microorganismos del Laboratorio de Fitopatología de CORBANA (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Detalle del hospedero, año y lugar de procedencia de los aislamientos de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* Raza 1 seleccionados para la secuenciación.

Código del aislamiento	Cultivo/Varietad	Localidad	Año
1 - 3	Banano / Gross Michel	Jiménez	2020
4	Banano / Gross Michel	Matina	2019
5 - 16	Banano / Gross Michel	Matina	2020
18	Banano / Gross Michel	Pérez Zeledón	2019
19	Banano / Gross Michel	Sixaola	2019
21 - 25	Banano / -	Turrialba	2019
26	Banano / FHIA 23	Turrialba	2020
27, 28	Banano / Gross Michel	Turrialba	2020
29	Guineo cuadrado / -	Upala	2019

El material por secuenciar se seleccionó con base en tres criterios: maximizar la representatividad temporal y espacial de la submuestra, resultado positivo en una PCR punto final con los oligonucleótidos Foc-1 (5'-CAGGGGATGTATGAGGAGGCT) y Foc-2 (5' GTGACAGCGTCGTCTAGTTCC'), específicos para Raza 1 (Line *et al.*, 2009), y disponibilidad de al menos 30 µl con una concentración  $\geq 20$  ng/µL y  $\geq 10$  ng/µL determinada por espectrometría (Nanodrop) y fluorimetría (Quantus), respectivamente.

Las preparaciones de ADN fueron enviadas a SeqCenter LLC (Pittsburgh, Estados Unidos) donde se prepararon librerías con el kit Illumina DNA Prep, basado en tagmentación y PCR, haciendo uso de índices duales de 10 pb y un tamaño de inserto de 280 pb. La secuenciación se realizó en un equipo Illumina NovaSeq X Plus, generando lecturas pareadas de  $2 \times 151$  pb.

### Análisis bioinformático

Las lecturas crudas fueron evaluadas con FastQC y los resultados consolidados con MultiQC. La remoción de adaptadores y el recorte por calidad se llevó a cabo con bcl-convert v4.2.4 y fastp, respectivamente. Las lecturas depuradas se mapearon contra el genoma de referencia de *F. oxysporum* f. sp. *ubense* II5 (Raza 4 Tropical; GCA\_031834405.1) utilizando BWA-MEM2, y los archivos BAM resultantes se procesaron con Picard para marcar duplicados. Este genoma de referencia se seleccionó

por alta completitud y amplio uso en estudios comparativos (Maymon *et al.* 2020; Guo *et al.*, 2014).

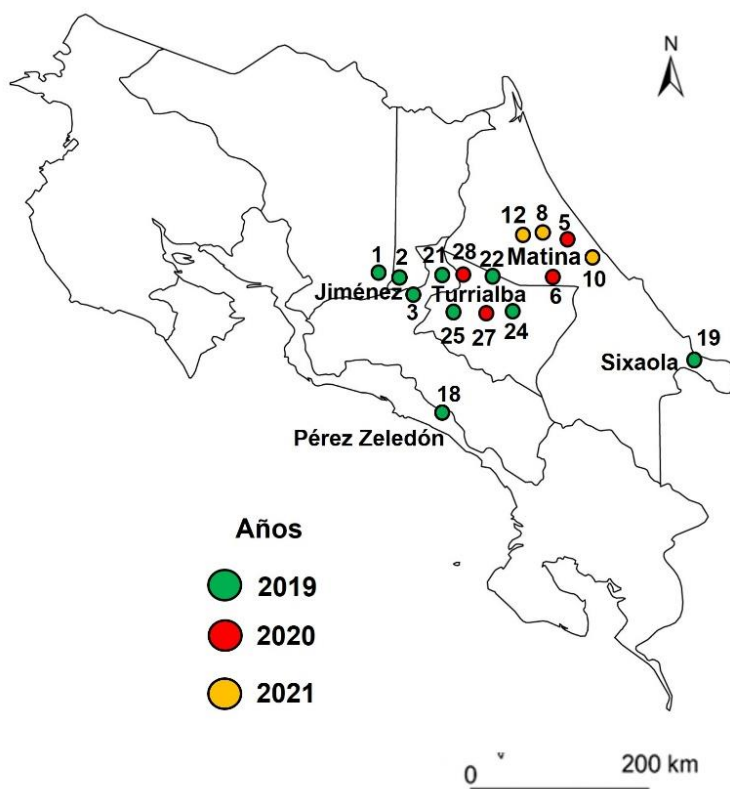
Se calcularon métricas de mapeo y cobertura con samtools, incluyendo el porcentaje de lecturas mapeadas, la cobertura promedio, el porcentaje del genoma cubierto a  $\geq 10\times$ , la tasa de duplicados y la tasa de desajustes. Solamente aquellos mapeos con  $>90\%$  de lecturas mapeadas, cobertura  $>20\times$ ,  $\geq 85\%$  del genoma cubierto a  $\geq 10\times$ , duplicados  $<30\%$ , y mismatches  $\leq 3\%$  fueron retenidos para análisis posteriores.

El llamado de variantes se realizó con el pipeline MycoSNP (Bagal *et al.* 2022) que generó matrices de core SNPs tras filtrar posiciones con profundidad  $<10\times$ , baja calidad o exceso de datos faltantes. Los SNPs se alinearon y exportaron en formato FASTA para generar un árbol filogenético el cual se construyó con IQ-TREE v2.x mediante el modelo GTR+F+ASC+G4, empleando 1 000 réplicas de UFBoot y SH-aLRT. Este dendograma no enraizados se visualizó en Microreact junto con metadatos de localidad y año.

## RESULTADOS

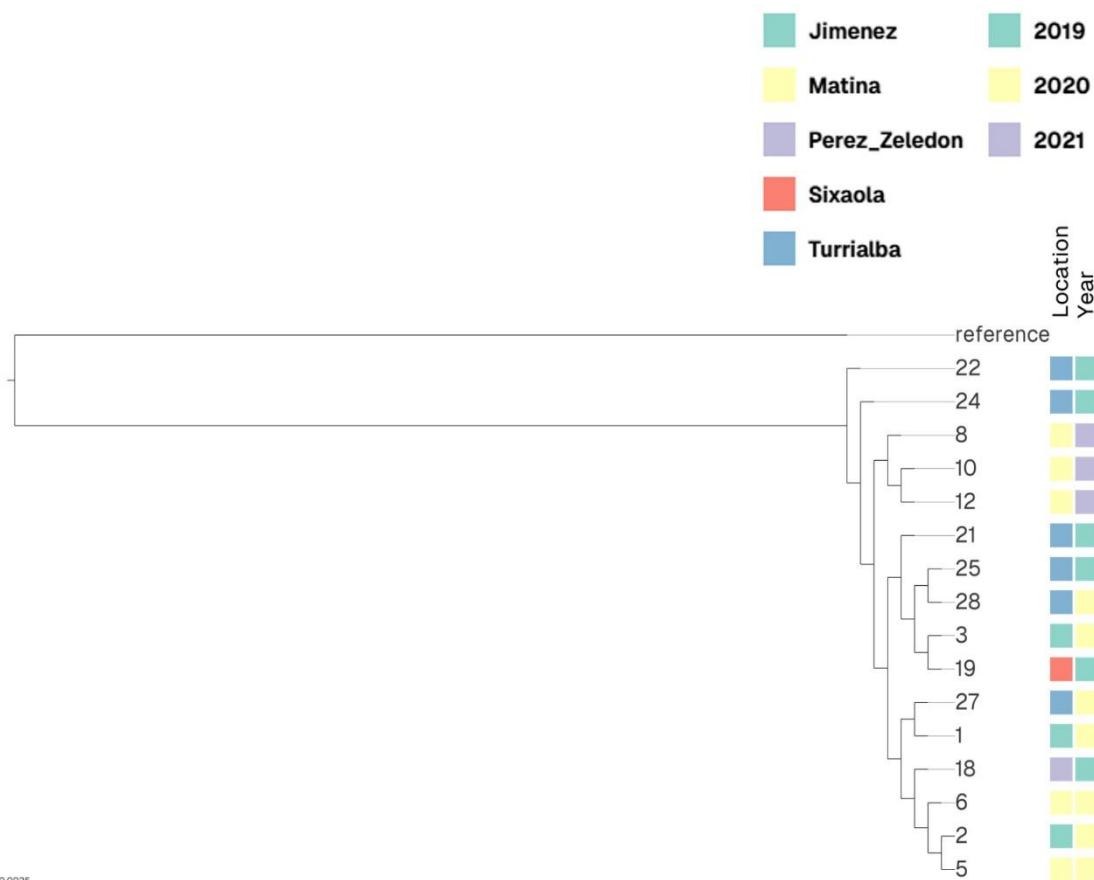
El número total de lecturas por muestra osciló entre 71 056 300 y 142 386 386 pb, mientras que el total de bases con calidad superior a Q30 varió entre 9 644 674 477 y 18 884 320 773 pb por muestra. El porcentaje de bases con calidad  $> Q30$  se situó entre  $95.3\%$  y  $97.0\%$ , lo que refleja la alta calidad general de los datos de secuenciación obtenidos en este estudio.

Tras la evaluación de las métricas de mapeo y cobertura, se excluyeron las muestras 4, 7, 9, 11, 14, 15, 16, 24, 26 y 29, por no cumplir con los umbrales críticos de calidad. Este filtrado garantizó la robustez y uniformidad de la cobertura a lo largo del genoma de referencia, reduciendo el riesgo de sesgos en la detección de variantes. Consecuentemente, el análisis filogenético final se realizó únicamente con 16 genomas: tres de Jiménez (2020: 1, 2 y 3), dos de Matina (2020: 5 y 6) y tres de Matina (2021: 8, 10 y 12), una de Pérez Zeledón (2019: 18), una de Sixaola (2019: 19), cuatro de Turrialba (2019: 21, 22, 24 y 25) y dos de Turrialba (2020: 27 y 28) (Figura 1).



**Figura 1.** Procedencia geográfica y año de recolección de los aislamientos de *F. oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1 incluidos en el análisis filogenético.

El análisis de los genomas reveló una distancia genética de 49 a 379 SNPs por par de aislamientos (promedio de 217 SNPs), lo que indica una baja variabilidad genética dentro de la población de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1 (Foc R1) analizada. El árbol filogenético agrupó todos los aislamientos en un único clado, sin diferenciación evidente por año ni región, lo que indica un linaje clonal dominante dentro del país. En contraste, el genoma de referencia utilizado (aislamiento II5, Raza 4 Tropical) se ubicó en un clado completamente separado, confirmando la clara divergencia filogenética entre las razas 1 y 4 del patógeno (Figura 2).



**Figura 2.** Árbol filogenético de los aislamientos de *F. oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1, basado en SNPs utilizado el aislamiento I15, Raza 4 Tropical como genoma de referencia.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman una baja variabilidad genética entre los aislamientos de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1 (Foc R1) recolectados en Costa Rica, lo que evidencia la presencia de un linaje clonal estable y ampliamente distribuido. La reducida cantidad de SNPs entre genomas coincide con lo reportado en Ecuador, donde la homogeneidad fue atribuida a un único evento de introducción seguido de su dispersión vegetativa mediante material de siembra y movimiento del suelo (Magdama *et al.*, 2020).

A escala global, Foc R1 presenta una estructura poblacional compleja, con múltiples linajes genéticos independientes y una alta diversidad representada en numerosos VCGs descritos en Asia, África y América (Fourie *et al.*, 2009; Ploetz, 2015). Se han documentado variantes genéticamente divergentes asociadas a distintos hospederos y regiones agroecológicas, como en India (Thangavelu *et al.*, 2024), así

como la coexistencia de varios linajes en un mismo país de Sudamérica (Magdama *et al.*, 2020). En contraste, los aislamientos costarricenses analizados muestran niveles de divergencia considerablemente menores, lo que sugiere que la diversidad local representa solo una fracción del repertorio genético conocido de Foc R1. Este patrón de baja variabilidad resalta la necesidad de ampliar el muestreo y comparar futuros aislamientos con colecciones internacionales para determinar si el linaje detectado corresponde a una introducción histórica aislada o a una variante que ha permanecido estable y dominante en el país. Asimismo, la identificación de un linaje clonal dominante ofrece una oportunidad para el desarrollo de herramientas moleculares específicas —como marcadores diagnósticos dirigidos o paneles de SNPs— que faciliten la trazabilidad de focos y fortalezcan los programas de vigilancia fitosanitaria.

La baja diversidad genética observada en este estudio podría estar relacionada con el modo de reproducción predominantemente asexual del complejo *Fusarium oxysporum*, en el que la variación genética surge principalmente por mutaciones puntuales y, en menor medida, por la transferencia horizontal de cromosomas accesorios (Maryani *et al.*, 2019). En este trabajo, el análisis se centró en el genoma central conservado (“*core genome*”), mediante el mapeo contra el genoma de referencia de Foc R4T, con el objetivo de caracterizar la diversidad genómica compartida de Foc R1 en Costa Rica. Bajo este enfoque, es posible que variaciones estructurales o diferencias localizadas en cromosomas accesorios, conocidos por su asociación con patogenicidad, queden infrarrepresentadas. En consecuencia, aunque los aislamientos analizados muestran una alta homogeneidad a nivel del genoma central, futuros estudios podrán profundizar en el análisis de cromosomas accesorios y genes de virulencia para explorar con mayor detalle posibles diferencias funcionales entre los aislamientos.

La confirmación preliminar de identidad mediante los marcadores Foc-1/Foc-2 permitió asegurar que los aislamientos seleccionados correspondieran efectivamente a Foc R1, que estableció una base confiable para el análisis genómico. Este enfoque garantizó la inclusión de muestras auténticas y comparables, mientras que la diversidad genética se evaluó posteriormente a partir de SNPs distribuidos a lo largo del genoma completo, lo que proporciona una resolución robusta y representativa de los linajes presentes en el país. A futuro, la incorporación de un mayor número de aislamientos y enfoques complementarios permitirá explorar en mayor detalle la variabilidad existente dentro de la raza a nivel nacional.

La detección del mismo linaje en zonas distantes, como Turrialba, Matina y Pérez Zeledón, sugiere que la diseminación de Foc R1 en Costa Rica se ha producido a través de fuentes comunes de inóculo o de prácticas agrícolas que facilitan el transporte del

hongo entre fincas. Hallazgos similares fueron reportados en India, donde la dispersión estuvo asociada al movimiento de plantas de vivero y de material vegetal infectado (Thangavelu *et al.*, 2024). Estos resultados refuerzan la estabilidad del linaje dominante y su capacidad para colonizar múltiples regiones productoras.

Comprender la estructura poblacional de Foc R1 es clave para fortalecer los programas de vigilancia molecular del país. Foc R1 comparte con Foc R4T características epidemiológicas críticas como su persistencia prolongada en el suelo, dificultad de erradicación y de dispersión mediante material vegetal infectado (Ploetz, 2015; Thangavelu *et al.*, 2024). La línea base generada en este estudio facilitará la detección diferencial de nuevas razas, la identificación temprana de eventos inusuales y la implementación de medidas preventivas de bioseguridad en finca ante la amenaza del ingreso de R4T a la región.

Desde una perspectiva epidemiológica, la estabilidad genética de Foc R1 ofrece un escenario predecible en cuanto a su comportamiento, pero también subraya su capacidad para permanecer en el suelo por largos períodos (Batlle y Pérez, 2009). En consecuencia, las estrategias de manejo deben centrarse en prácticas preventivas, como la eliminación de residuos infectados, la desinfección de herramientas y el uso de material vegetal certificado, para evitar la dispersión del linaje dominante o la introducción de nuevas variantes al país.

## CONCLUSIONES

Nuestro análisis genómico de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 1 (Foc R1) en Costa Rica reveló una baja variabilidad genética entre aislamientos de diferentes regiones y años, lo que indica la presencia de un linaje clonal estable, posiblemente originado por un evento único de introducción. Esta homogeneidad sugiere una dispersión local asociada al movimiento de material vegetal y de suelo contaminado, y subraya la necesidad de fortalecer las medidas de vigilancia fitosanitaria y de trazabilidad. La línea base generada constituye un insumo clave para la detección diferencial de nuevas razas del patógeno y para la planificación de estrategias de manejo preventivo en el país.

## REFERENCIAS

- Batlle A and Pérez L. 2009. La marchitez por *Fusarium* en banano y plátano: manejo integrado y aspectos epidemiológicos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Fourie G, Steenkamp ET, Gordon TR and Viljoen A. 2009. Evolutionary relationships among the *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* vegetative compatibility groups. *Fungal Biology*, 113(8), 753–760. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2009.06.005>

- Magdama F, Serrano L, Sosa D, Coronel E, Jiménez E and Cevallos JM. 2020. Genomic characterization of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Race 1 in Ecuador reveals low genetic diversity and a clonal population structure. *Plant Disease*, 104(7), 2040–2049. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-19-2174-RE>
- Manzo-Sánchez G, Ploetz RC, Rivas GG and Pérez-Vicente L. 2017. Diagnosis and management of Fusarium wilt of banana: A guide for growers and extension workers. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Maryani N, Lombard L, Poerba YS, Subandiyah S, Crous PW and Kema GHJ. 2019. Phylogeny and genetic diversity of the banana Fusarium wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in Indonesia. *Plant Pathology*, 68(5), 1103–1116. <https://doi.org/10.1111/ppa.13025>
- Ploetz RC. 2015. Fusarium wilt of banana. *Phytopathology*, 105(12), 1512–1521. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0101-RVW>
- Thangavelu R, Gopi M, Mustaffa MM, Loganathan M, Kavino M and Uma S. 2024. Population structure and pathogenic variation of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in India. *Plant Disease*, 108(2), 345–356. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-22-2904-RE>
- Vásquez J. 2021. Diversity and distribution of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 in Colombia. *European Journal of Plant Pathology*, 159(3), 561–573. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-02191-5>.

## De las ómicas al campo: inducción de defensa en banano frente a *Pseudocercospora fijiensis*

Héctor A. Rodríguez C.<sup>1\*</sup>, Juan P. Ossa<sup>2</sup>, Juan G. Morales<sup>3</sup>, Wilmar A. Reyes<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Profesor, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agronómicas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, <sup>2</sup>Investigador, Grupo de AgroBiotecnología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, <sup>3</sup>Profesor, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agronómicas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, <sup>4</sup>Technical Development Manager Latam North, Verdesian Lifesciences

**\*Autor de correspondencia:**

Héctor A. Rodríguez C.  
hearodriguezca@unal.edu.co

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Biotecnología y Ómicas

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

**Cita:**  
Rodríguez CH, Ossa JP,  
Morales JG, Reyes WA. 2026.  
De las ómicas al campo:  
inducción de defensa en banano  
frente a *Pseudocercospora*  
*fijiensis*. *Acorbat Revista de*  
*Tecnología y Ciencia* 3(1): 129  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26129>

### RESUMEN

La Sigatoka negra, causada por *Pseudocercospora fijiensis*, es la principal enfermedad del banano en las zonas productoras tropicales. Su control depende en gran medida del uso intensivo de fungicidas químicos, frente a los cuales el patógeno ha desarrollado resistencia, aumentando los costos de producción y los riesgos ambientales. Este estudio evaluó el producto MACTIVE® Banana como inductor natural de defensa en el cultivo de banano, integrando análisis de campo y moleculares. El ensayo a nivel de laboratorio evaluó tinciones con DAB para evaluar la acumulación de peróxidos y análisis de transcriptómica para evaluar los genes expresados diferencialmente. A nivel de campo se realizó un diseño de bloques completos al azar con ocho tratamientos y tres repeticiones, y se evaluaron variables agronómicas, severidad de Sigatoka, eficacia de control y fitotoxicidad. Los resultados mostraron que MACTIVE® redujo significativamente la severidad de la enfermedad sin causar efectos fitotóxicos, mejoró la retención de frutos y mantuvo el peso de racimos entre cosechas. A nivel molecular, se observó la activación de rutas de señalización hormonal asociadas al etileno y ácido jasmónico, así como de genes PR y peroxidasas. Estos hallazgos demuestran que MACTIVE® constituye una herramienta eficaz y sostenible para el manejo integrado de la Sigatoka negra, contribuyendo a reducir el uso de fungicidas y fortaleciendo la resiliencia del cultivo.

**Palabras clave:** Sigatoka negra, *Musa*, Inductores de defensa, Mactive®, Manejo integrado

### ABSTRACT

Black Sigatoka, caused by *Pseudocercospora fijiensis*, is the main disease affecting banana production in tropical regions. Its control largely depends on the intensive use of chemical fungicides, against which the pathogen has developed resistance, increasing production costs and environmental risks. This study evaluated the product MACTIVE® Banana as a natural defense inducer in banana cultivation, integrating both field and molecular analyses. Laboratory assays included DAB staining to assess hydrogen peroxide accumulation and transcriptomic analyses to identify differentially expressed genes. In the field, a randomized complete block design with eight treatments and three replications was established, and agronomic variables, disease severity, control efficacy, and phytotoxicity were evaluated. Results showed that MACTIVE® significantly reduced disease severity without causing phytotoxic effects, improved fruit retention, and maintained bunch weight between harvests. At the molecular level, the activation of hormonal signaling pathways associated with ethylene and jasmonic acid was observed, as well as the induction of PR and peroxidase genes. These findings demonstrate that MACTIVE® is an effective and sustainable tool for the integrated management of Black Sigatoka, contributing to reduced fungicide use and enhanced crop resilience.

**Keywords:** Black Sigatoka, *Musa*, Defense inducers, Mactive®, Integrated management



## INTRODUCCIÓN

La Sigatoka negra, causada por *Pseudocercospora fijiensis* (M. Morelet) Deighton (Churchill, 2011), es la enfermedad foliar más importante del banano en las regiones tropicales, ocasionando severas pérdidas de rendimiento por reducción del área fotosintética y envejecimiento prematuro de las hojas (Stover y Simonds, 1987). Su control se basa principalmente en la aplicación frecuente de fungicidas, lo que ha favorecido la aparición de cepas resistentes, incrementando los costos de producción y el impacto ambiental (Chong *et al.*, 2010). Frente a esta situación, se requiere incorporar estrategias sostenibles que reduzcan la dependencia de productos de síntesis química y fortalezcan los mecanismos naturales de defensa del cultivo.

Los avances en biología molecular y en ciencias ómicas han permitido comprender cómo los genotipos resistentes activan tempranamente respuestas de defensa. En variedades como Calcutta 4 se ha descrito la inducción rápida de enzimas como PAL, POX y glucanasas, y la activación de rutas metabólicas asociadas a etileno (ET), ácido jasmónico (JA) y ácido salicílico (SA), claves para la inmunidad y la resistencia sistémica adquirida (Torres *et al.*, 2012; Rodríguez, 2018). A partir de este conocimiento se han desarrollado inductores de resistencia, compuestos que estimulan las defensas naturales de la planta sin actuar directamente sobre el patógeno, promoviendo la síntesis de metabolitos secundarios y proteínas relacionadas la respuesta de la planta al ataque de patógenos (Conrath *et al.*, 2015).

Entre estas innovaciones destaca MACTIVE® Banana, un inductor natural formulado para activar las rutas hormonales de defensa del banano. Estudios previos reportaron su capacidad para inducir proteínas PR1, PR2 y PR3 en *Arabidopsis thaliana* y activar respuestas de defensa en especies tropicales bajo condiciones de campo (Verdesian Life Sciences, 2021). En banano, estos mecanismos se relacionan con la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), la acumulación de peróxidos y la expresión de genes asociados a la transducción de señales hormonales (Rodríguez, 2018).

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de MACTIVE® Banana como inductor de defensa en plantas de banano frente a *P. fijiensis*, integrando ensayos de campo y análisis moleculares. Se buscó determinar su eficacia en la reducción de la severidad de la enfermedad y su influencia sobre la activación de mecanismos fisiológicos y genéticos de defensa, con el propósito de validar su potencial como herramienta sostenible dentro del manejo integrado del cultivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ensayos de laboratorio

**Preparación de inóculo e inoculación con *P. fijiensis*.** Los aislados de *P. fijiensis* CIRAD86 y CIRAD139 se cultivaron en medio PDA a 25 °C durante 21 días. Las esporas se obtuvieron por raspado y lavado de colonias, filtradas en gasa estéril y centrifugadas a 5000 rpm por 10 min. El sedimento se resuspendió en agar al 2 % hasta  $1 \times 10^6$  conidios·mL<sup>-1</sup>. La suspensión se aplicó sobre el envés de las hojas 2 y 3 mediante atomizador manual, asegurando cobertura homogénea. Las plantas control se les aplicó agua destilada estéril sin inóculo del hongo.

**Aplicación de tratamientos.** Se evaluaron seis tratamientos: Planta Sana (Un), Planta solo con aceite (O), Planta solo con MACTIVE® (M), Plantas inoculadas con el hongo (S), Plantas con aceite + inoculación de hongo (OS) y Planta con + aceite + MACTIVE® + inoculación (MS). Para cada tratamiento se evaluaron 3 plantas (replicas biológicas) representados por 3 hojas (réplicas técnicas). Las hojas se recolectaron a 24 y 72 h postratamiento (hpt). Se prepararon dos soluciones base: una con MACTIVE® Banana y otra sin principio activo. Cada litro contenía 173.9 mL de aceite Banole, 1.8 mL de emulsificante y 624.3 mL de agua; la mezcla activa incluyó 60.9 mL del producto.

**Tinción con DAB (3,3'-diaminobenzidina).** La detección de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se realizó infiltrando hojas con DAB (1 mg/mL, pH 3.8) bajo vacío 2 min, incubando a 4 °C por 2 h y decolorando con etanol: ácido acético (3:1). Las muestras se observaron al microscopio (400×), analizando 10 campos por tratamiento (~170 células/campo). La tinción marrón indicó acumulación de peróxido de hidrógeno y activación oxidativa.

**Extracción y purificación de ARN total.** Las hojas recolectadas se maceraron en nitrógeno líquido y se extrajo ARN total con buffer CTAB modificado. El ARN se purificó con fenol:cloroformo, se precipitó con LiCl 10 M, se lavó con LiCl 2 M y etanol 75 %, y se resuspendió en agua libre de nucleasas. La calidad se verificó por electroforesis y la pureza por espectrofotometría (A<sub>260</sub>/A<sub>280</sub> = 1.8–2.1).

**Análisis transcriptómico y bioinformático.** Las lecturas se evaluaron con FastQC y depuraron con Trimmomatic. El alineamiento contra *Musa acuminata* (GCA\_036884655.1) se realizó con HISAT2, y los conteos por gen con HTSeq-count. Los genes diferencialmente expresados ( $|\log_2FC| > 1$ ;  $p \leq 0.05$ ) se identificaron con DESeq2. El análisis funcional se realizó con BinGO (FDR  $\leq 0.05$ ) y los patrones de expresión se visualizaron mediante PCA.

## Ensayos de campo

**Condiciones del estudio.** El ensayo se realizó en el cantón Simón Bolívar (provincia del Guayas, Ecuador), una zona bananera con alta incidencia de Sigatoka negra. El sitio (80 m s. n. m.) presenta 800 mm de precipitación anual, 26 °C de temperatura promedio, 80 % de humedad relativa y suelos francos (Estación Agrometeorológica del Guayas). El cultivo recibió manejo agronómico estándar (riego, fertilización y control de plagas), sin fungicidas durante el ensayo.

**Diseño experimental y tratamientos.** Se empleó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con ocho tratamientos, incluido un control absoluto, y tres repeticiones. Cada parcela contó con 23 plantas, seleccionando 3 por parcela con alturas entre 1.5 y 2.0 m y  $\geq 9$  hojas activas. Los tratamientos incluyeron combinaciones de MACTIVE®, Mancozeb, Rotación y Tiviant. Se evaluaron: índice de severidad de *P. fijiensis*, eficacia de control (Abbott), peso de racimos, pérdida de peso entre cosechas y fitotoxicidad (escala B.B.A).

**Análisis estadístico.** Los datos se analizaron mediante ANOVA y prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Las medias se expresaron  $\pm$  error estándar, y la fitotoxicidad se registró en escalas visuales. Los análisis se realizaron en R v4.3.1, empleando ggplot2 y agricolae para la representación gráfica y comparación de tratamientos.

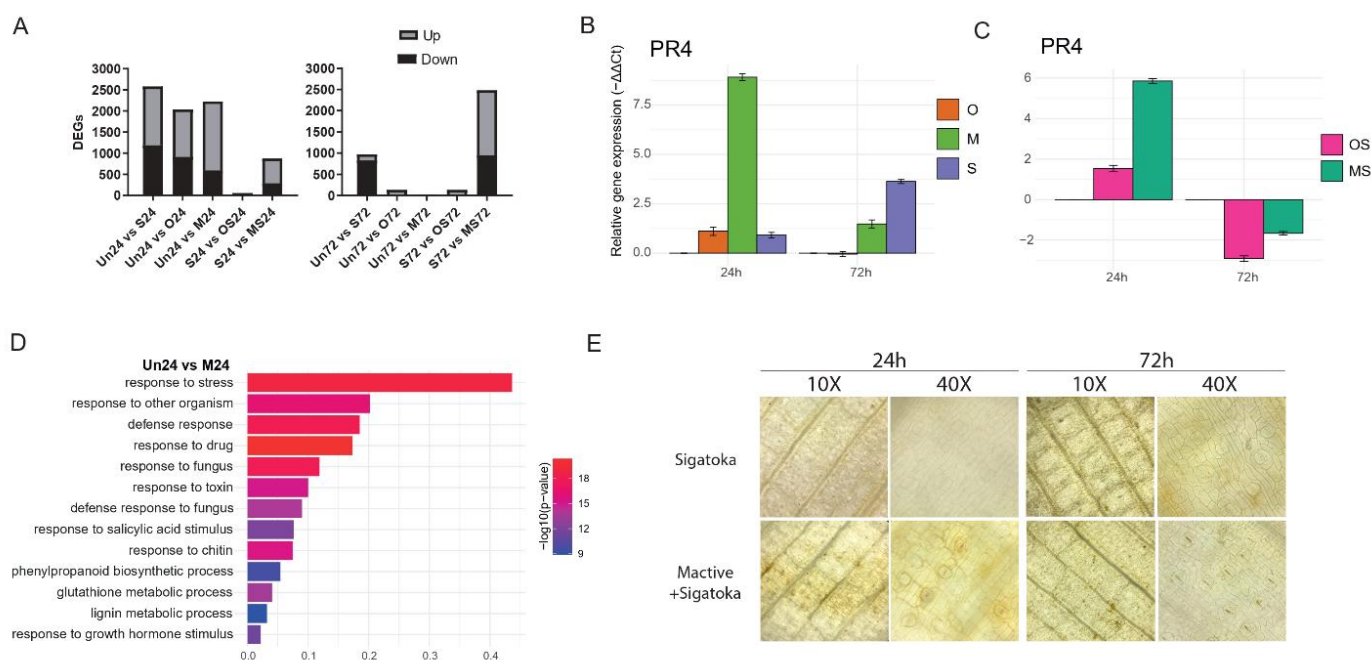
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis transcriptómico reveló que la aplicación de MACTIVE® Banana produjo una amplia reprogramación génica en plantas de banano, con una respuesta más intensa a las 24 horas postratamiento (hpt) que a las 72 hpt (Figura 1A), lo que evidencia una activación temprana de los mecanismos de defensa. Se observó regulación positiva de genes asociados a las vías de señalización hormonal del etileno (ET) y del ácido jasmónico (JA), hormonas clave en la respuesta frente a hongos necrotrofos y biotrofos. Entre los genes diferencialmente expresados (DEGs) se destacaron los relacionados con la biosíntesis de proteínas PR, lipoxigenasas (LOX), fenilalanina amonio liasa (PAL) y peroxidasas (POX) (Tabla 1, Figura 1B-C), todas involucradas en la defensa oxidativa y estructural de las plantas (Rodríguez *et al.*, 2016; Torres *et al.*, 2012).

El patrón de activación observado sugiere que MACTIVE® Banana induce respuestas tempranas de inmunidad vegetal similares a las de genotipos naturalmente resistentes, promoviendo tanto la inmunidad basal (PTI) como la inmunidad activada por proteínas efectoras (ETI). En particular, la activación de genes tipo R y de receptores de reconocimiento de patrones (PRRs), indica que el producto potencia la

capacidad de detección y señalización frente a señales moleculares asociadas al ataque fúngico (Wu *et al.*, 2014; Ramírez-Zavaleta *et al.*, 2022).

Asimismo, se observó la activación de genes involucrados en la síntesis de lignina y compuestos fenólicos, así como de enzimas hidrolíticas como quitinasas,  $\beta$ -1,3-glucanasas y  $\beta$ -glucosidasas, las cuales participan en la degradación de la pared celular de los hongos y en el reforzamiento de la integridad del tejido vegetal (Figura 1D, Tabla 1). Este comportamiento refleja una defensa multifactorial, que combina respuestas bioquímicas y estructurales para limitar el progreso de la infección (Kumar *et al.*, 2018; Perrot *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022).



**Figura 1.** Efecto de MACTIVE® Banana sobre la respuesta transcripcional y fisiológica en plantas de banano frente a la Sigatoka Negra. **(A)** Número total de genes diferencialmente expresados (DEGs) identificados a las 24 y 72 horas post-tratamiento (hpt). Se muestran los DEGs regulados positivamente (Up) y negativamente (Down), considerando un umbral estadístico de  $p$ -ajustado  $< 0.05$  y  $|LFC| \geq 1$ . **(B–C)** Expresión relativa del gen PR4, determinada mediante RT-qPCR y calculada usando el método  $\Delta\Delta Ct$ , a las 24 y 72 hpt. En (B) se presenta la expresión relativa respecto a los controles no tratados (Un24 y Un72), mientras que en (C) se muestra la expresión relativa en comparación con los controles infectados con *P. fijiensis* (S24 y S72). Los valores corresponden al promedio  $\pm$  la desviación estándar. **(D)** Análisis de enriquecimiento funcional (Gene Ontology, procesos biológicos) de los DEGs sobreexpresados en la comparación Un24 vs M24, destacando categorías asociadas a respuesta a estrés, defensa, interacción con otros organismos y metabolismo de compuestos secundarios. La escala de color indica la significancia estadística expresada como  $-\log_{10}(p\text{-valor})$ . **(E)** Detección histoquímica de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) en hojas de banano mediante tinción con DAB, evaluada a las 24 y 72 hpt. Se muestran micrografías representativas a aumentos de 10X y 40X

de plantas inoculadas con *P. fijiensis*, en ausencia y presencia de MACTIVE® Banana, evidenciando diferencias en la acumulación de especies reactivas de oxígeno.

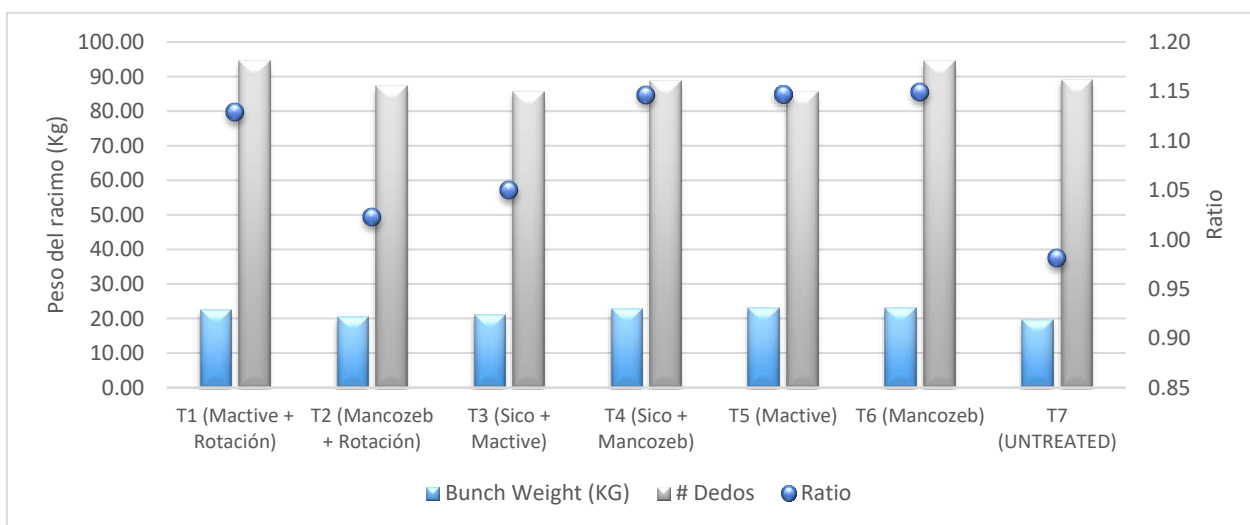
**Tabla 1.** Resumen de genes expresados diferencialmente a las 24 horas postratamiento.

Comparación	Gen ID	LFC	P-adj	Descripción
Un24 vs M24	LOC103997618	13.5	7.1092E-12	pterocarpan synthase 1-like
	LOC103971552	13.4	2.819E-12	flavonoid 3',5'-hydroxylase 1-like
	LOC135630808	12.1	2.4927E-14	pathogenesis-related protein 1-like
	LOC103987931	11.0	8.5162E-14	transcription factor WRKY45-2
	LOC135624241	9.2	3.3459E-08	glucan endo-1,3-beta-glucosidase-like
	LOC103969242	8.1	9.4816E-06	peroxidase A2
	LOC135587114	7.7	6.5611E-32	pathogenesis-related protein PR-4-like
	LOC108951737	7.5	0.0017608	ethylene-responsive transcription factor 5-like
	LOC103978140	5.7	2.7184E-14	phenylalanine ammonia-lyase
	LOC135671902	4.0	0.00015672	allene oxide synthase 1, chloroplastic-like
	LOC135592975	3.2	0.00080651	lipoxygenase 8
S24 vs MS24	LOC135604757	12.3	6.1742E-18	GDSL esterase/lipase At5g55050-like
	LOC103977653	10.6	4.44E-12	pathogenesis-related protein 1-like
	LOC103971944	9.8	7.30E-08	caffeic acid 3-O-methyltransferase-like
	LOC103988275	9.6	1.5238E-08	monooxygenase 2
	LOC135609102	9.4	2.8059E-08	ethylene-response factor C3-like
	LOC135613710	7.8	1.13E-03	jasmonate-induced oxygenase 2-like
	LOC135675632	7.5	9.64E-06	pathogenesis-related protein PR-4-like
	LOC135637221	6.2	0.03768858	salicylic acid-binding protein 2-like
	LOC135629118	4.8	2.59E-12	phenylalanine ammonia-lyase
LOC135634593	3.9	0.00969626	allene oxide synthase 1, chloroplastic-like	

Los resultados histoquímicos obtenidos mediante tinción con DAB mostraron una clara acumulación de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) en las hojas tratadas con MACTIVE® Banana (M y MS), en contraste con los controles. La coloración marrón intensa observada en el apoplasto, el citoplasma de células epidérmicas y los ostiolos estomáticos indicó una respuesta oxidativa localizada (Figura 1E). Este comportamiento concuerda con el rol del  $H_2O_2$  como molécula señal en los procesos de defensa, favoreciendo el cierre estomático y la limitación del avance del patógeno (Meddya *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2018). En conjunto, los resultados confirman que MACTIVE® estimula una respuesta oxidativa controlada, fortaleciendo las barreras físicas y activando rutas de defensa secundarias.

En los ensayos de campo, los tratamientos con MACTIVE®, tanto en combinación con fungicidas (T3: Mactive + Rotación) como aplicados de forma

independiente (T7: Mactive), redujeron significativamente la severidad de la Sigatoka negra respecto al testigo no tratado (T9). Los índices de severidad se mantuvieron por debajo del 30 %, mientras que el control superó el 60 %. La eficacia de control (Abbott) alcanzó valores superiores al 65 % en los tratamientos integrados, demostrando un efecto complementario entre el inductor y los fungicidas. Además, los tratamientos con MACTIVE® conservaron un peso promedio de racimo de 22.1 kg entre cosechas, con una variación del 1 %, frente a pérdidas del 6–10 % en los tratamientos sin inductor, lo que refleja un impacto positivo sobre la retención de frutos y la estabilidad del rendimiento durante la temporada seca. A partir de la evaluación de índice de severidad de *P. fijiensis*, eficacia de control (Abbott), peso de racimos, pérdida de peso entre cosechas (Figura 2) y fitotoxicidad (escala B.B.A.), se observó que el cultivo avanzó satisfactoriamente, y no se producían efectos negativos sobre el follaje o producción. También se determinó que Mancozeb, solo o en combinación, y MACTIVE® muestran un desempeño superior frente al testigo sin tratamiento.



**Figura 2.** Efecto de diferentes tratamientos fungicidas sobre el peso del racimo, número de dedos y ratio en banano bajo incidencia de *P. fijiensis*.

No se observaron síntomas de fitotoxicidad, como clorosis o necrosis en hojas jóvenes, lo que confirma la compatibilidad fisiológica y seguridad del producto para uso foliar. En conjunto, los resultados de laboratorio y campo evidencian que MACTIVE® Banana actúa como un inductor sistémico de defensa, capaz de activar tempranamente rutas hormonales y oxidativas asociadas a la resistencia frente a *P. fijiensis*. Su aplicación reduce la severidad de la enfermedad, mantiene la productividad

y favorece un manejo más sostenible del cultivo, constituyéndose en una alternativa eficaz dentro de los programas de manejo integrado de la Sigatoka negra.

## CONCLUSIONES

MACTIVE® Banana actúa como un inductor natural de defensa capaz de activar rutas hormonales, enzimáticas y estructurales asociadas a la resistencia del banano frente a *P. fijiensis*. Los resultados obtenidos en campo confirman su eficacia para reducir la severidad de la Sigatoka negra sin generar fitotoxicidad, contribuyendo a la sostenibilidad del manejo integrado del cultivo. Su uso representa una alternativa complementaria a los fungicidas convencionales, favoreciendo la resiliencia productiva y ambiental de los sistemas bananeros.

## REFERENCIAS

- Apel K and Hirt H. 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55, 373–399.
- Churchill ACL. 2011. *Mycosphaerella fijiensis*, the black leaf streak pathogen of banana. *Molecular Plant Pathology*, 12(4), 307–328.
- Conrath U, *et al.* 2015. Priming for enhanced defense. *Annual Review of Phytopathology*, 53, 97–119.
- Luna E and Ton J. 2012. The epigenetic machinery controlling transgenerational systemic acquired resistance. *Plant Signaling & Behavior*, 7(6), 615–618.
- Love MI, *et al.* 2014. Moderated estimation of fold change and dispersion for RNA-seq data with DESeq2. *Genome Biology*, 15(12), 550.
- Rodríguez HA. 2018. Transcriptomic and metabolomic profiling of Musa genotypes in response to *P. fijiensis*. Tesis. Universidad Nacional de Colombia.
- Stover RH and Simonds R. 1987. Black Sigatoka: an increasing threat to banana cultivation. *FAO Plant Protection Bulletin*, 35, 123–132.
- Verdesian Life Sciences. 2023. Technical report: MACTIVE® Banana as resistance inducer. Raleigh, NC, USA.
- Walters DR, *et al.* 2013. *Induced resistance for plant defense: a sustainable approach to crop protection*. Wiley-Blackwell.
- Mauch-Mani B, *et al.* 2017. Defense priming and its trade-offs in plants. *Trends in Plant Science*, 22(9), 791–804.

## La création de nouvelles variétés de bananes multi-résistantes pour augmenter la diversité variétale et éviter l'usage de pesticides

Frédéric Salmon<sup>1,8\*</sup>, Lucile Toniutti<sup>1,8</sup>, Frédéric Lambert<sup>1,8</sup>, Taylor Blondo<sup>1,8</sup>, Damien Hubert<sup>1,8</sup>, Jean-Claude Efile<sup>1,8</sup>, Chantal Guiougou<sup>1,8</sup>, Franck Marius<sup>1,8</sup>, Jean-Marie Delos<sup>1,8</sup>, Florentin Pietrus<sup>1,8</sup>, Mathieu Joyeux<sup>1,8</sup>, Marine Seidel<sup>2,9</sup>, Cassandre Jolivet<sup>3,9</sup>, Catherine Abadie<sup>4,9</sup>, Marcel Bohrer<sup>5</sup>, N. Lubin<sup>3,9</sup>, Emmanuel Wicker<sup>3,9</sup>, Sandrine Andypain<sup>6,10</sup>, B. Barral<sup>6,10</sup>, Mathieu Léchaudel<sup>7,10</sup>  
<sup>1</sup>CIRAD, UMR AGAP Institut, Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France; <sup>2</sup>CIRAD, UMR PHIM, Capesterre-Belle-Eau, France; <sup>3</sup>CIRAD, UMR PHIM, Montpellier, France; <sup>4</sup>CIRAD, UMR PHIM, Costa Rica; <sup>5</sup>IT2, Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France; <sup>6</sup>CIRAD, UMR QualiSud, Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France; <sup>7</sup>CIRAD, UMR QualiSud, Saint Pierre, Réunion, France; <sup>8</sup>UMR AGAP Institut, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France; <sup>9</sup>PHIM, Plant Health Institute, Univ Montpellier, INRAE, CIRAD, Institut Agro, Montpellier, France; <sup>10</sup>Qualisud, Université Montpellier, Institut Agro, CIRAD, Avignon Université, Université de la Réunion, Montpellier, France

**\*Autor de correspondencia:**

Frédéric Salmon  
hearodriguezca@unal.edu.co

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Recursos genético y  
mejoramiento

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**  
Salmon F, Toniutti L, Lambert F, Blondo T, Hubert D, et al. 2026. La création de nouvelles variétés de bananes multi-résistantes pour augmenter la diversité variétale et éviter l'usage de pesticides. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 130  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26130>

### RÉSUMÉ

Les bananes dessert, essentielles à la sécurité alimentaire dans les pays en développement et majeures sur les marchés occidentaux, reposent sur une base génétique étroite, les rendant vulnérables à des maladies fongiques comme la cercosporiose noire et le *Fusarium* TR4. Ces pathogènes ont des impacts économiques et environnementaux majeurs. Cette étude évalue trois hybrides triploïdes (Cirad 964, 965, 966), issus du programme d'amélioration variétale du Cirad, pour leur résistance à ces maladies, leurs performances agronomiques, sensorielles et post-récolte. Les tests en conditions contrôlées, avec quatre isolats de TR4, révèlent une résistance élevée pour la 965 et 966, et intermédiaire pour la 964. Face à la cercosporiose noire, les trois hybrides montrent une résistance partielle, liée à un ralentissement du cycle du champignon et une réduction de la capacité de sporulation sexuée comparée à la Cavendish. Agronomiquement, leurs régimes dépassent 25 kg, avec des profils adaptés aux marchés locaux (964) ou à l'export (966). Les tests post-récolte indiquent une bonne acceptabilité sensorielle. Une méthodologie basée sur la somme des degrés-jours a permis d'optimiser le stade de récolte selon les marchés ciblés. Ces hybrides pourraient ainsi réduire l'usage de pesticides, diversifier l'offre variétale et favoriser la transition agroécologique des filières locales ou export.

**Mots clés:** *Musa* spp., *Fusarium*, Cercosporiose noire, Multi-résistance, Sélection variétale, Diversification

### ABSTRACT

Dessert bananas, essential to food security in developing countries and major players in Western markets, are based on a narrow genetic, making them vulnerable to fungal diseases such as black leaf streak and *Fusarium* TR4. These pathogens have major economic and environmental impacts. This study evaluates three triploid hybrids (Cirad 964, 965, 966), developed by the CIRAD breeding programme, for their resistance to these diseases and their agronomic, sensory and post-harvest performance. Tests under controlled conditions, using four TR4 isolates, revealed high resistance for 965 and 966, and intermediate resistance for 964. Against black leaf streak disease, the three hybrids show partial resistance, linked to a slowing of the fungus cycle and a reduction in ascospore production compared to Cavendish. Agronomically, their weights exceed 25 kg, with profiles suited to local markets (964) or export (966). Post-harvest tests indicate good sensory acceptability. A methodology based on the sum of degree days has made it possible to optimise the harvest stage according to the target markets. These hybrids could thus reduce pesticide use, diversify the range of varieties available and promote the agroecological transition of local or export markets.

**Keywords:** *Musa* spp., *Fusarium*, Black leaf streak, Multi-resistance, Varietal selection, Diversification



## INTRODUCTION

Les bananes dessert jouent un rôle crucial dans la sécurité alimentaire et nutritionnelle des pays de nombreux pays tropicaux, tout en étant un fruit majeur sur les marchés européens et nord-américains. Avec une production mondiale dépassant les 149 millions de tonnes en 2021, cette production comprend la banane dessert, avec 103 millions de tonnes produites, dont 24 millions exportées, qui repose sur un nombre limité de variétés appartenant principalement au sous-groupe Cavendish (*Musa acuminata*, AAA). Cette base génétique extrêmement restreinte rend le marché mondial particulièrement vulnérable aux changements climatiques, aux ravageurs et aux maladies aux maladies fongiques telles que la cercosporiose noire (causée par *Pseudocercospora fijiensis*) et la fusariose (causée par *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* « Tropical Race 4 » (Foc-TR4) et Race 1). La gestion phytosanitaire de ces maladies a des impacts économiques et environnementaux importants. Pour relever ces défis, le Cirad a développé une approche originale d'amélioration variétale conventionnelle, appelée "Reconstructive Breeding", visant à créer des hybrides triploïdes adaptée aux contraintes biologiques des bananiers, permettant la création de nouvelles variétés hybrides de bananes dessert résistantes aux stress biotiques et abiotiques. Cette approche est déployée via une plateforme de création et de sélection intégrée dans un réseau multi-locale, visant à diversifier la gamme de variétés disponibles pour différents marchés en développant des variétés multirésistantes acceptables par les consommateurs et adaptées aux attentes des marchés (Salmon *et al.*, 2023). La sélection des hybrides s'effectue en plusieurs phases, sur une période de 12 à 15 ans. La première phase consiste à éliminer les hybrides présentant des défauts critiques, tels qu'une sensibilité aux maladies, un poids de régime insuffisant ou des caractéristiques de fruits non conformes. Les hybrides retenus sont ensuite multipliés *in vitro* et évalués en micro-parcelles en station expérimentale pour leur productivité, leur résistance aux maladies et leur qualité fonctionnelle et sensorielle. Enfin, les variétés les plus prometteuses sont testées en conditions réelles, dans différents environnements, pour confirmer leur adaptation aux pratiques culturelles locales.

Cette étude présente les résultats de l'évaluation de trois nouveaux hybrides du Cirad (Cirad964, Cirad965, Cirad966) arrivées en fin de phase d'évaluation en station expérimentale avant d'intégrer un réseau d'évaluation multisite. Cette caractérisation dont l'objectif est d'établir une carte d'identité de référence s'est faite d'une part en conditions contrôlées pour leur résistance aux Foc-race 1 et Foc-TR4, et d'autre part en conditions expérimentales dans le cadre de la plateforme de création et de sélection sur la station Neufchâteau en Guadeloupe pour leur résistance à la cercosporiose noire, leurs performances agronomiques, leurs qualités fonctionnelles et sensorielles.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

Pour l'ensemble des évaluations, les vitroplants ont été produits *in vitro* au laboratoire de CIV du CIRAD Neufchâteau, et multipliées par Vitropic (Saint-Mathieu-de-Trévières, France).

Les observations sur le terrain ont été réalisées en 2021 et 2022 à la station expérimentale du Cirad de Neufchâteau en Guadeloupe (Antilles françaises; 16°08'N, 61°60'O; altitude 250 m, précipitation annuelle moyenne de 3500 mm; température moyenne 25 °C, sol classé comme andosol avec les caractéristiques suivantes: pH 5,5, 9,5 % de matière organique, 62 % d'argile, 32 % de limon et 6 % de sable). Les hybrides 964, 965 et 966 ont été plantés à la densité de 1600 pieds ha<sup>-1</sup> dans un champ organisé en micro-parcelles de 120 plants par hybride, séparés par une ligne de 30 plants de la variété Cavendish Cv.902, témoin sensible à la cercosporiose non traités. Les évaluations ont été réalisées à la même période, sur dix plantes par génotype, au même stade végétatif. La parcelle expérimentale a été préparée à la rotobèche et amendée grâce à l'apport de matière organique à raison de 90 t/ha de Fertigwa. La fertilisation a été fractionnée mensuellement, avec une quantité d'engrais minéral de 270 kg d'azote (N) par hectare et par an (NPK 14-4-28 + 6MgO). Aucun produit phytosanitaire n'a été appliquée. Cette parcelle a ainsi été conduite de manière raisonnée, l'enherbement ayant été contrôlée par fauchage mécanique.

La Foc-TR4 n'étant pas répandue dans les Antilles françaises, la réponse des hybrides à l'infection par Foc-TR4 a été évaluée dans des conditions contrôlées dans une serre du Cirad à Montpellier. Les hybrides ont été testés avec les témoins sensibles Cavendish Cv.902 et Gros Michel, ainsi que Calcutta 4 comme témoin résistant. Les vitroplants ont suivi une phase d'endurcissement de 12 semaines avant d'être inoculés à l'aide de 30 g de millet grains de millet (*Panicum miliaceum*) infectés par *Fusarium*, selon une version modifiée de (Viljoen *et al.*, 2017). Une étude génomique mondiale ((Matthews, 2023); Wicker *et al.*, en préparation) a révélé que le Foc-TR4 était génétiquement structuré en quatre sous-lignées, nommées TR4-SC01 à TR4-SC04. Quatre isolats représentatifs de Foc-TR4 (tous dans VCG 01213/16) ont été sélectionnés: (i) MAY0001 (TR4-SC01), provenant de Mayotte; (ii) la référence II5 (TR4-SC02), codée ici IDN0001 et également nommée NRRL 54006, provenant d'Indonésie; (iii) CHN0001 (TR4-SC03) provenant de Chine; CAV0842 (TR4-SC04) provenant de l'est de l'Indonésie. Dans une expérience distincte, les plantes ont été exposées à l'isolat RUN0001 de la Foc race 1 (clade B de FOsc, VCG0124/22, Foc-SC04 *sensu* (Mostert *et al.*, 2022)). Chaque combinaison de génotype végétal et d'isolat fongique a été testée sur huit à dix plantes. Les plantes ont ensuite été cultivées et incubées dans une serre contrôlée (30 °C le jour/28 °C la nuit, ~ 85 % d'humidité

relative) pendant 10 semaines. Pour l'évaluation finale, les plantes ont été déracinées, les bulbes individuels ont été coupés dans le sens de la longueur, évalués selon l'échelle de Dita de 1 à 5 pour les symptômes internes, puis photographiés. Un taux de symptômes internes (ISR) a été calculé en suivant l'approche de (Zuo *et al.*, 2018). Sur cette échelle, 1 = aucun symptôme (ISR = 0); 2 = décoloration initiale du rhizome (ISR = 25); 3 = légère décoloration du rhizome le long de l'ensemble du système vasculaire (ISR = 50); 4 = rhizome dont la plupart des tissus internes présentent une nécrose (ISR = 75); 5 = rhizome totalement nécrosé (ISR = 100). Les indices de maladie (IM) ont été calculés où  $IM = [\sum(\text{score sur l'échelle} \times \text{fréquence}) / (\text{nombre total de plantes} \times \text{classe maximale sur l'échelle})] \times 100 \%$ , qui ont ensuite été utilisés pour classer le matériel génétique comme résistant (R:  $0 < IM \leq 24 \pm 1 \%$ ); partiellement résistant ou modérément sensible (MS:  $25 < IM \leq 44 \pm 1 \%$ ); sensible (S:  $45 < IM \leq 64 \pm 1 \%$ ); très sensible (VS:  $65 < IM \leq 84 \pm 1 \%$ ), ou extrêmement sensible (XS:  $IM \leq 85 \%$ ).

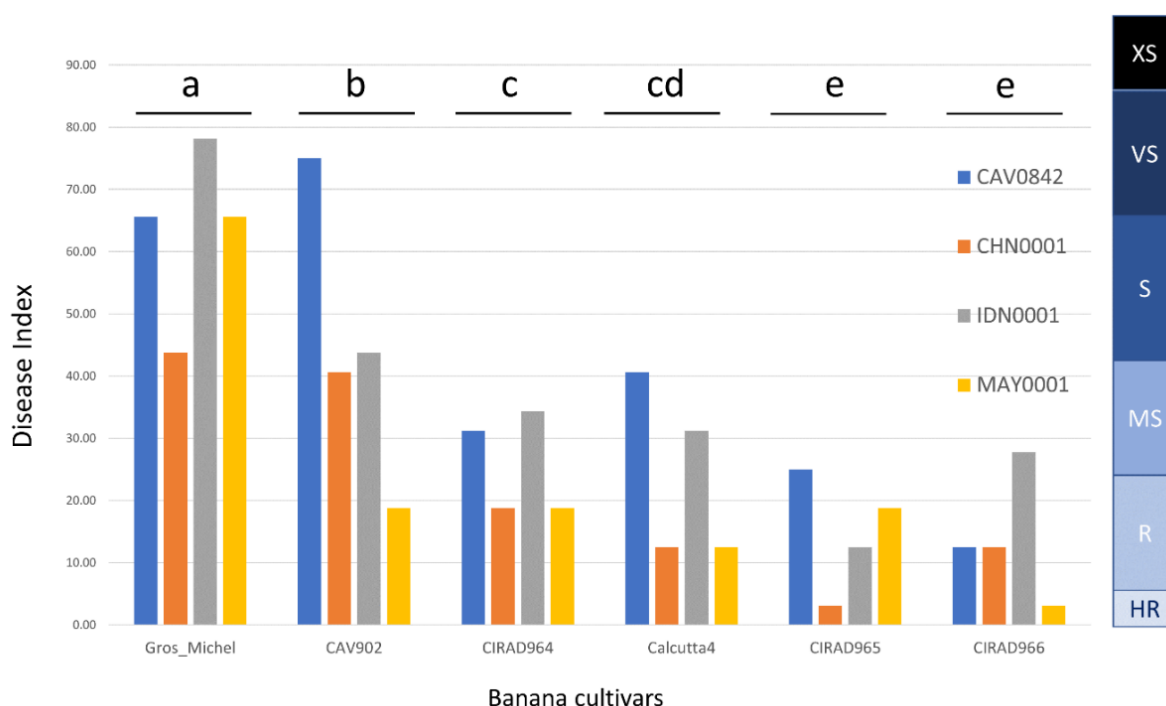
La résistance à la cercosporiose noire a été évaluée au champ à la station expérimentale de Neufchâteau (Guadeloupe) sur 10 individus par hybride sur deux cycles culturels comme décrit dans la publication de (Jolivet *et al.*, 2025). Les différents paramètres mesurés ont permis de déduire la durée d'évolution totale du champignon c'est-à-dire le temps entre l'infection et la sporulation sexuée. De même, la capacité de sporulation sexuée a été évaluée en suivant la méthode publiée par Zapater *et al.* (2008).

Les hybrides ont aussi été évalués pour leur architecture (hauteur, circonférence) leur productivité (poids des régimes, nombre de mains et de doigts), leur caractéristique des fruits à différents stades de récoltes (export, local et 1er fruit jaunissant sur pied), leur qualité commerciale (durée de vie verte, sensibilité au dégrain, au brunissement et aux meurtrissures) et leur qualité sensorielle pour évaluer le goût, la texture et l'acceptabilité des fruits.

Concernant la détermination des stades de récolte, les valeurs des paramètres, à savoir la température seuil et la somme des degrés-jours correspondante, pour un cultivar donné et un marché cible, ont été estimées à partir de l'approche détaillée dans Lechaudel *et al.* (2026). Cette approche a utilisé différents ensembles de données: (i) l'intervalle entre la floraison (définie comme la date à laquelle l'inflorescence était pendante, toutes les bractées étaient complètement ouvertes et toutes les mains étaient en position horizontale) et la maturation (définie comme la date à laquelle le premier fruit jaune a été observé sur le régime) (FRI), (ii) la température moyenne quotidienne pendant le FRI, (iii) la durée de vie verte à 20 °C et le diamètre des fruits externes et internes de la zone médiane de la troisième main pour différentes régimes récoltées à différents âges.

## RÉSULTATS

Face à la Foc TR4, le cultivar le plus sensible était Gros Michel, suivi de Cavendish Cv.902. Parmi les trois hybrides, la 964 semblait présenter une résistance intermédiaire (selon les isolats considérés). Le témoin résistant Calcutta4 était nettement plus résistant, mais pas immune. La 965 et la 966 ont présenté le niveau de résistance le plus élevé, contrôlant les quatre souches. Les isolats différaient en termes d'agressivité, CAV0842 étant le plus agressif, suivi par IDN0001 (II5), CHN0001 et MAY0001.

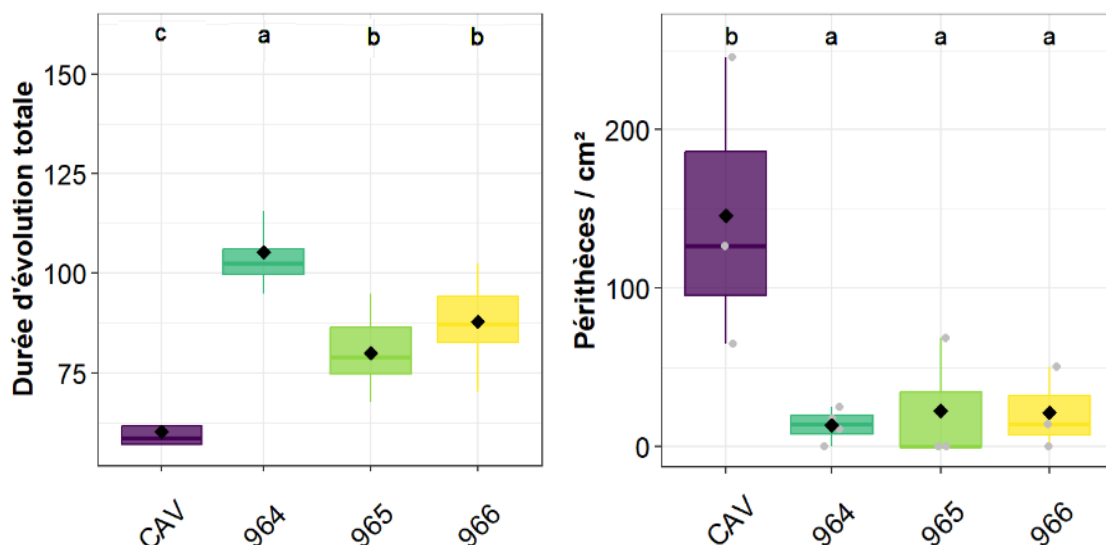


**Figure 1.** Indice de maladie induit par les quatre isolats Foc TR4 sur les cultivars de bananiers. Les barres marquées de lettres différentes sont significativement différentes les unes des autres (test de Tukey, P = 0,05).

Face à Foc-Race1, Gros Michel (avec un Indice de Maladie de 53) s'est révélé sensible, tandis que Cavendish (IM=15,625) et Calcutta4 (IM=12,5) se sont montrés résistants. Parmi les hybrides, 965 (IM=12,5) s'est révélé résistant, tandis que les 964 (IM=3,125) et 966 (IM=0) se sont révélés hautement résistants.

Concernant l'étude du comportement des variétés vis-à-vis de la cercosporiose noire au champ, la durée d'évolution totale de la maladie indiquant la durée nécessaire jusqu'à l'apparition du stade nécrotique est significativement plus longue que celle de

la *Cavendish*. La capacité de sporulation des hybrides est très faible comparativement à celle de la *Cavendish* (Figuré. 2).



**Figure 2.** Composantes de résistance vis-à-vis de la cercosporiose noire des 3 hybrides comparativement au témoin sensible Cavendish: durée d'évolution totale (à gauche) et capacité de sporulation (à droite).

Dans l'ensemble, les trois hybrides ont montré une résistance partielle à la cercosporiose noire, grâce à deux mécanismes complémentaires: d'une part, un allongement du cycle de développement du champignon sur ces hybrides, et d'autre part, une réduction de sa capacité à produire des ascospores.

A la floraison, les résultats obtenus sur les 3 hybrides montrent une augmentation moyenne de 30 % de la hauteur et de la circonférence entre le premier et le deuxième cycle. La 965 est la moins grande des trois, tandis que la 966, avec un rapport hauteur/circonférence supérieur à 6 au deuxième cycle, apparaît comme la moins robuste. Les trois variétés présentent plus de 7 feuilles érigées à la floraison, confirmant leur résistance partielle à la cercosporiose noire, sans nécessiter d'effeuillage. Le nombre de mains et de doigts est particulièrement élevé pour les variétés 964 et 966, dépassant 12 mains et 240 doigts au deuxième cycle, tandis que la 965 affiche des valeurs légèrement inférieures. Les récoltes ont été réalisées à trois stades physiologiques: export (60 % de l'Intervalle Floraison-Jaunissement, IFJ), local (75 % IFJ), et IFJ (100 %). Les poids des régimes varient de 25 kg (stade export) à plus de 35

kg (stade IFJ). La variété 964 se distingue par des fruits de petite taille, similaires aux variétés locales *Figue Pomme* et *Figue Sucré*, tandis que les variétés 965 et 966 présentent des formats intermédiaires entre la *Cavendish* et la *Figue Pomme*. Bien que le poids moyen des régimes soit inférieur à celui de la *Cavendish*, ces hybrides offrent l'avantage de cycles de récolte rapides, permettant plus de 2 récoltes par an, contre 1,4 pour la *Cavendish*.

Pour chaque variété, les températures de base et les sommes de température en degrés-jours ont été estimées en fonction des marchés cibles (export et local) (Tableau 1). Ces données permettent d'estimer et programmer les dates de récolte pour optimiser la maturité des fruits. Par exemple, pour le marché local, une récolte tardive est recommandée pour maximiser le remplissage des doigts, tandis que pour l'export, un stade de 20 jours de durée de vie verte (DVV) à 20 °C est nécessaire pour éviter un jaunissement prématuré pendant le transport.

**Tableau 1:** Estimation de la température de base ( $\theta$  en °C) et des stades de récolte des variétés 964, 965 et 966.

Variété	$\theta$ (°C)	Somme des degrés-jours pour le marché d'exportation (°C jours)	Somme des degrés-jours pour le marché local (°C jours)
964	5.1	1485.4	1946.5
965	-2.8	2094.5	2640.6
966	5.4	1312.5	1707.8

D'un point de vue qualité commerciale, les tests post-récolte réalisés en conditions contrôlées en Guadeloupe ont révélé une faible sensibilité au brunissement pour les trois variétés, similaire à celle de la *Cavendish*, ce qui est un atout pour leur commercialisation. En revanche, la sensibilité aux meurtrissures varie: la 964 est la plus sensible, suivie de la 966, tandis que la 965 présente une sensibilité modérée. Enfin, les trois variétés montrent une faible sensibilité au dégrain, avec une durée de vie commerciale prolongée, en particulier pour la 964.

Au niveau organoleptique, les tests hédoniques ont mis en évidence une typicité distincte pour chaque variété: 964: bon équilibre sucre/acide, mais texture peu ferme après 8 jours; 965: équilibre sucre/acide similaire, avec une fermeté maintenue et une texture moyennement farineuse; 966: fruit le plus sucré, avec une intensité aromatique marquée et une texture fermement maintenue. La durée de vie de consommation est

longue pour les trois variétés, avec un optimum de consommation atteint plus rapidement pour la 964.

## DISCUSSION

Les nouvelles variétés Cirad 964, 965 et 966, développées dans cette étude, se distinguent par leurs résistances combinées à la fusariose race 1 et TR4, maladies majeures pour lesquels les solutions phytosanitaires actuelles restent inefficaces. Leur évaluation vis-à-vis de Foc TR4 a été menée contre quatre lignées représentatives de la diversité mondiale de ce pathogène (TR4-SC01 à TR4-SC04), renforçant ainsi le statut multi-résistance des hybrides. Parmi ces variétés, les 965 et 966 présentent une résistance marquée à Foc-TR4, tandis que la 964 affiche une résistance modérée. Bien que ces résultats aient été obtenus en conditions contrôlées et favorables au pathogène, leur validation en milieu naturel, notamment dans des zones fortement infestées comme le nord du Pérou, s'avère indispensable pour confirmer leur potentiel en conditions réelles.

L'évaluation multi-composante de la résistance à la cercosporiose noire a révélé que certains hybrides, qui auraient été écartés sur la base du seul de l'indice de feuilles non nécrosées ou de la sévérité, présentent en réalité une résistance effective sur d'autres aspects clés du pathosystème, comme une sporulation sexuée ou des durées de latence conidiennes (Jolivet *et al.*, 2025). Cette approche globale, intégrant plusieurs critères, réduit les biais de sélection et permet d'identifier des variétés durablement résistantes.

D'autre part, des essais préliminaires menés à La Réunion, dans un contexte de forte pression parasitaire due au Freckle (*Phyllosticta cavendishii*), montre une sensibilité réduite des hybrides par rapport à la *Cavendish* sensible à ce champignon, limitant ainsi le recours aux fongicides.

Les multiples résistances observées chez les hybrides Cirad repose sur une stratégie intégrée combinant des croisements ciblés et une sélection phénotypique rigoureuse. En favorisant la transmission de « paquets » de gènes plutôt que de gènes individuels, cette approche pourrait limiter la capacité d'adaptation des pathogènes, notamment en réduisant la phase sexuée de leur cycle de vie et ainsi limiter le contournement rapide de ces résistances (Dumartinet *et al.*, 2022). Cette méthode, en exploitant la diversité génétique des bananiers et en sélectionnant des combinaisons de gènes de résistance, renforcerait la durabilité de ces variétés dans des environnements contraignants tout en réduisant la dépendance aux intrants chimiques.

Une étude antérieure, basée sur le modèle AMMI pour analyser les interactions Génotype × Environnement (GxE), a montré que certaines variétés hybrides présentent une homéostasie marquée, tandis que d'autres font preuve d'une plasticité adaptative (Toniutti *et al.*, 2024). Cette variabilité suggère une adaptation différentielle selon les zones de production, justifiant une évaluation multisite en partenariat avec des acteurs locaux. Cette phase est essentielle pour affiner les pratiques culturales, notamment l'optimisation du remplissage des fruits, la gestion de l'œilletonnage, et l'étude de la stabilité des variétés sur plusieurs cycles. Elle permettra également d'adapter les pratiques post-récolte, en tenant compte de la sensibilité modérée à la meurtrissure par exemple et des exigences spécifiques des filières locales et export (Lechaudel *et al.*, 2023). L'adoption de nouvelles variétés de bananiers se heurte souvent aux exigences strictes du marché, notamment celles imposées par la Cavendish, qui reste la référence en termes de qualité post-récolte sur le marché export. Développer des hybrides multirésistants répondant à l'ensemble de ces critères représente un défi majeur. Dans ce contexte, les New Breeding Techniques (NBT) pourraient offrir une solution pour parfaire ces variétés, en ciblant précisément les caractères agronomiques ou qualitatifs encore limitants, tout en préservant les résistances acquises. Ces outils permettraient d'accélérer l'obtention de variétés combinant durabilité, résistance aux pathogènes et conformité aux attentes des filières commerciales.

Enfin, l'introduction de ces hybrides multi-résistants s'inscrit dans une dynamique de transition agroécologique, en promouvant des systèmes de production diversifiés (mélange variétal, association avec le cacao, agroforesterie). Leur adoption pourrait contribuer à réduire la dépendance aux monocultures monovariétales, renforçant ainsi la résilience des systèmes face aux aléas climatiques. Leur développement nécessitera une adaptation des pratiques culturales, tant en pré-récolte (œilletonnage, fertilisation, castration) qu'en post-récolte (conservation, commercialisation), afin de répondre aux exigences des différents marchés.

## CONCLUSION

Les nouvelles variétés de bananes multi-résistantes développées par le Cirad présentent un potentiel réel pour diversifier l'offre variétale sur les marchés. Ces variétés pourraient jouer un rôle clé dans la réduction des pesticides, et la transition agroécologique des différentes filières locale et export. Après cette phase de caractérisation variétale, les perspectives de développement variétal doivent maintenant passer par une phase d'adaptation des itinéraires techniques pré- et post-récolte, spécifiques pour chaque partenaire, en fonction des conditions culturales et du circuit de commercialisation ciblé.

## RÉFÉRENCES

- Dumartinet T, Ravel S, Roussel V, Perez-Vicente L, Aguayo J, Abadie C, Carlier J. 2022. Complex adaptive architecture underlies adaptation to quantitative host resistance in a fungal plant pathogen. *Molecular Ecology*. 31(4): 1160-1179.
- Léchaudel M, Andypain S, Mbégué Mbégué D, Gros O and Salmon F. 2023. How to improve commercial quality of a new hybrid of banana by managing postharvest conditions and increasing knowledge in physiological injury?. *Acta Hort.* 1364, 257-264.
- Léchaudel M, Andypain S, Barral B, Dépigny S, Carval D, Abufera B, Wyvekens A, Lambert F, Efile JC, Joyeux M, Pietrus F, Salmon F. 2026. Estimating the optimum harvest date of dessert and plantain varieties by adapting thermal time sum method. *Experimental Agriculture*. Submitted.
- Jolivet C, Abadie C, Bohrer M, Ravel S, Mejias J, Seidel M, Efile JC, Roussel V, Pages C, Lubin N, Saveljeva N, Baril L, Carlier J and Salmon F. 2025. Variation in quantitative resistance components to the fungus *Pseudocercospora fijiensis* causing black leaf streak disease among banana genotypes. *Plant Pathology*, 74, 2857-2879.
- Mostert D, Wicker E, de Jager MM, Al Kaabi SM, O'Neill WT, Perry S, Li C, Yi G, Pegg KG, Mostert L and Viljoen A. 2022. A polyphasic approach reveals novel genotypes and updates the genetic structure of the banana fusarium wilt pathogen. *Microorganisms* 10, 2, 269.
- Salmon F, Bakry F, Efile JC, Ricci S, Toniutti L and Horry JP. 2023. Banana breeding at CIRAD: creating resistant new cultivars to avoid the use of pesticides. *Acta Hort.* 1367, 201-208.
- Toniutti L, Jolivet C, Efile JC, Pietrus F, Gilbert S, Horry JP, Carval D, Salmon F. 2024. Evaluation de la stabilité des performances agronomiques de variétés élites de bananes desserts au sein d'une gamme d'environnements. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 1(1): 4
- Viljoen A, Mahuku G, Massawe C, Ssali RT, Kimunye J, Mostert G, Ndayanzamaso P and Coyne DL. 2017. Banana diseases and pests: field guide for diagnostics and data collection. International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria.
- Zapater M-F, Abadie C, Pignolet L, Carlier J, Mourichon X. 2008. Diagnosis of *Mycosphaerella* spp., responsible for *Mycosphaerella* leaf spot diseases of bananas and plantains, through morphotaxonomic observations. *Fruits* 63, 389-393.
- Zuo CW, Deng GM, Li B, Huo HQ, Li CY, Hu CH, Kuang RB, Yang QS, Dong T, Sheng O and Yi GJ. 2018. Germplasm screening of *Musa* spp. for resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (Foc TR4). *European Journal Plant Pathology*, 151, 723-734

## Potencial reproductivo de diploides mejorados (*Musa AA*) bajo trópico húmedo para el mejoramiento genético convencional del subgrupo Cavendish

Robins S. Flores G<sup>1\*</sup>, Jorge A. Sandoval<sup>2</sup>, Rafael Segura M<sup>1</sup>, Edson Perito A<sup>3</sup>, Fabian Echeverría B<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dirección de investigaciones Corporación Bananera Nacional (CORBANA), <sup>2</sup>Investigador independiente, <sup>3</sup>Embrapa Mandioca y Fruticultura, <sup>4</sup>Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC)

**\*Autor de correspondencia:**

Robins S. Flores G.  
roflores@corbana.co.cr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Recursos genéticos y mejoramiento

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**  
Flores GR, Sandoval JA, Segura MR, Perito AE, Echeverría BF. 2026. Potencial reproductivo de diploides mejorados (*Musa AA*) bajo trópico húmedo para el mejoramiento genético convencional del subgrupo Cavendish. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 131 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26131>

### RESUMEN

El mejoramiento genético de los bananos comerciales es fundamental para enfrentar las limitantes que amenazan su producción sostenible, incluyendo enfermedades devastadoras como la marchitez por *Fusarium* raza 4 tropical (Foc R4T) y la Sigatoka negra. En este estudio se evaluó el impacto de posición de la inflorescencia masculina la viabilidad y germinación del polen de tres diploides mejorados de *Musa acuminata* (genomas AA: M53, 013018-01 y 013004-04), comparados con un diploide silvestre ('Calcutta 4') y un cultivar comercial no segregante (*Musa acuminata* cc. Pisang Mas) como testigo contrastante, bajo condiciones de trópico húmedo en Turrialba, Costa Rica. En este contexto, resultado esencial conocer la viabilidad y germinación del polen de dichos diploides bajo condiciones tropicales húmedas para optimizar las estrategias de hibridación. El efecto de la posición floral dentro de la inflorescencia masculina (posiciones proximal, medial y distal) ha sido poco explorado en *Musa* spp. El polen se obtuvo de flores masculinas en anthesis (7:00 am) ubicadas en la sección proximal (basal), medial o distal (apical) de la inflorescencia masculina (CC. Chira). Se determinó el porcentaje de viabilidad (tinción con Diacetato de fluoresceína (FDA)) y de germinación in vitro de los granos de polen. Los resultados mostraron diferencias significativas en la germinación según la posición floral de colecta, dependiendo del genotipo. En M53 y 013018-01 el polen de flores distales presentó la mayor germinación (~25–30 %), mientras que en 'Calcutta 4' la máxima germinación (~10 %) se obtuvo con polen de flores proximales, y en 013004-04 fue mayor en posición medial (~8 %). Todos los genotipos presentaron porcentajes de viabilidad polínica altos (>90 %), sin ser la posición un factor determinante. El cultivar 'Pisang Mas' no presentó datos de germinación en ninguno de los tratamientos evaluados, en el caso de la variable de viabilidad presentó resultados (~95 %), confirmando su esterilidad funcional. Estos hallazgos evidencian que la posición floral de recolección puede afectar la calidad germinativa del polen en banano de manera genotipo-específica.

**Palabras clave:** Banano Cavendish; Mejoramiento genético; Polen, Viabilidad, Germinación, Fertilidad

### ABSTRACT

The genetic improvement of banana (*Musa acuminata*) is essential to address the limitations threatening its sustainable production, including devastating diseases such as Fusarium wilt tropical race 4 (Foc TR4) and black Sigatoka. This study evaluated the impact of the male inflorescence position on the viability and germination of pollen from three improved diploids of *Musa acuminata* (genome AA: M53, 013018-01, and 013004-04), compared with a wild diploid ('Calcutta 4') and a non-fertile commercial cultivar (*M. acuminata* cv. Pisang Mas) as a contrasting control, under humid tropical conditions in Turrialba, Costa Rica. In this context, assessing pollen viability and germination under humid tropical conditions is essential to optimize hybridization strategies. However, the effect of floral position within the male inflorescence (proximal, medial, and distal positions) has been little explored



in *Musa* spp. Pollen was obtained from male flowers at anthesis (7:00 a.m.) located in the proximal (basal), medial, or distal (apical) section of the male inflorescence ('Chira'). The percentage of viability (staining with fluorescein diacetate, FDA) and in vitro germination of pollen grains were determined. Results showed significant differences in germination according to the floral position of collection, depending on the genotype. In M53 and 013018-01, pollen from distal flowers exhibited the highest germination (~25–30%), whereas in 'Calcutta 4' the highest germination (~10%) was obtained from proximal flowers, and in 013004-04 it was greater in the medial position (~8%). All genotypes showed high pollen viability (>90%), with position not being a determining factor. The cultivar 'Pisang Mas' showed no germination in any of the treatments evaluated; however, viability was high (~95%), confirming its functional sterility. These findings demonstrate that the floral position of pollen collection can affect the germinative quality of banana pollen in a genotype-specific manner.

**Keywords:** Cavendish banana, Genetic improvement, Pollen, Viability, Germination, Fertility

## INTRODUCCIÓN

El banano (*Musa* spp.) es un cultivo de alto impacto socioeconómico en regiones tropicales y subtropicales, constituyendo un alimento básico para más de 400 millones de personas (FAO, 2023). En Costa Rica y otros países bananeros, la producción comercial depende casi exclusivamente de los cultivares triploides del subgrupo Cavendish (genoma AAA), los cuales carecen de variabilidad genética y enfrentan graves amenazas fitosanitarias como la marchitez por *Fusarium* Raza 4 Tropical (Foc R4T), Sigatoka negra, entre otras. La limitada diversidad genética de los cultivares Cavendish los hace altamente vulnerables a estas enfermedades emergentes. Por ello, el mejoramiento genético del banano se ha vuelto una prioridad estratégica para introducir resistencia en nuevos cultivares, antes enfermedades sin método de control conocidos como el Foc R4T.

Uno de los mayores retos en el mejoramiento convencional del banano es la baja fertilidad de los cultivares comerciales triploides (AAA). Si bien no son completamente estériles, su producción de semilla es extremadamente reducida debido a anomalías cromosómicas y partenocarpia, lo cual dificulta obtener híbridos a partir de cruzamientos dirigidos. Actualmente, para superar esta barrera, se dispone de diploides mejorados (AA) con resistencia a enfermedades como Foc R4T. Estos diploides, desarrollados por programas de mejoramiento de EMBRAPA, Brasil, producen polen abundante y fértil, y se emplean como progenitores masculinos en cruzamientos dirigidos.

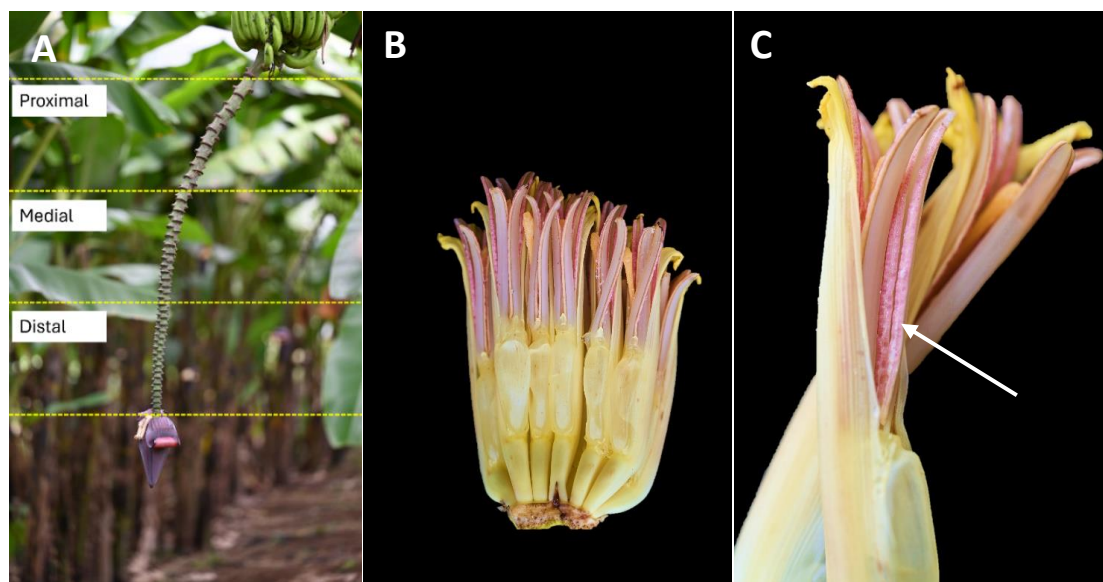
El entendimiento de la biología reproductiva de los parentales diploides es fundamental para mejorar la eficiencia de los cruzamientos. Siendo las variables de viabilidad (capacidad de los granos de polen de mantenerse vivos/metabólicamente activos) y germinación (capacidad de desarrollar un tubo polínico) las de interés. La

determinación de estos parámetros bajo diferentes condiciones de muestreo como el cultivar, el horario de recolección, y la posición de extracción del polen son aspectos claves para comprender la capacidad reproductiva y optimizar los cruzamientos dirigidos. Se ha evidenciado en publicaciones como la de Taliana *et al.* (2015), que la hora de recolección influye en la viabilidad del polen de banano (AA), en donde observaron mayor viabilidad en polen recolectado en horas de la mañana (8:00–10:00 h) en comparación con la tarde. La posición floral dentro de la inflorescencia masculina es otro factor importante pero menos evaluado. La apertura de flores masculinas en musáceas es de forma secuencial a lo largo del raquis en donde las condiciones fisiológicas son diferentes a lo largo de apertura floral masculina, no existen reporte de como la posición proximal (flores basales), medial o distal (flores apicales) en la inflorescencia afecta la viabilidad y germinación del polen en los diploides mejorados (AA).

En este trabajo se evaluó el efecto de la posición de recolección del polen sobre su viabilidad y germinación *in vitro* en diploides mejorados de *Musa acuminata* (AA) bajo condiciones de trópico húmedo en busca de generar información que facilite la selección y manejo de progenitores con mejor desempeño reproductivo en programas de mejoramiento de banano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se desarrolló entre junio y diciembre de 2023 en la finca comercial del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica (9°53'47" N; 83°40'08" O), en una zona de vida bosque húmedo premontano según Holdridge (1967). El sitio presenta una precipitación anual de 2100 mm, temperatura promedio de 23,7 °C (mínima 18,9 °C; máxima 28,6 °C) y humedad relativa de 80 %. Se evaluaron cinco genotipos diploides del grupo genómico *Musa* AA: tres diploides mejorados (M53, 013018-01 y 013004-04) desarrollados por EMBRAPA (Brasil), un diploide silvestre (*Musa acuminata* ssp. *burmannica*, cv. 'Calcutta 4') y un cultivar no segregante ('Pisang Mas') utilizado como testigo. Las plantas, establecidas en campo con 12 meses de edad, se emplearon como fuente de polen para analizar la influencia de la posición floral (proximal, medial y distal) sobre la fertilidad. Las flores masculinas en anthesis (7:00 a.m.) se recolectaron de brácteas ubicadas en las tres posiciones de la inflorescencia masculina, siguiendo el orden natural de apertura (Figura 1). Cada posición contó con tres repeticiones. Las inflorescencias fueron protegidas con bolsas de malla para evitar contaminación cruzada.



**Figura 1.** A. Representación de secciones y estructuras donde se realizó la extracción del polen. B. Conjunto de flores masculinas (bráctea); C. Zona de extracción de polen (Anteras con polen (Señalado)), utilizado en las pruebas de viabilidad y germinación.

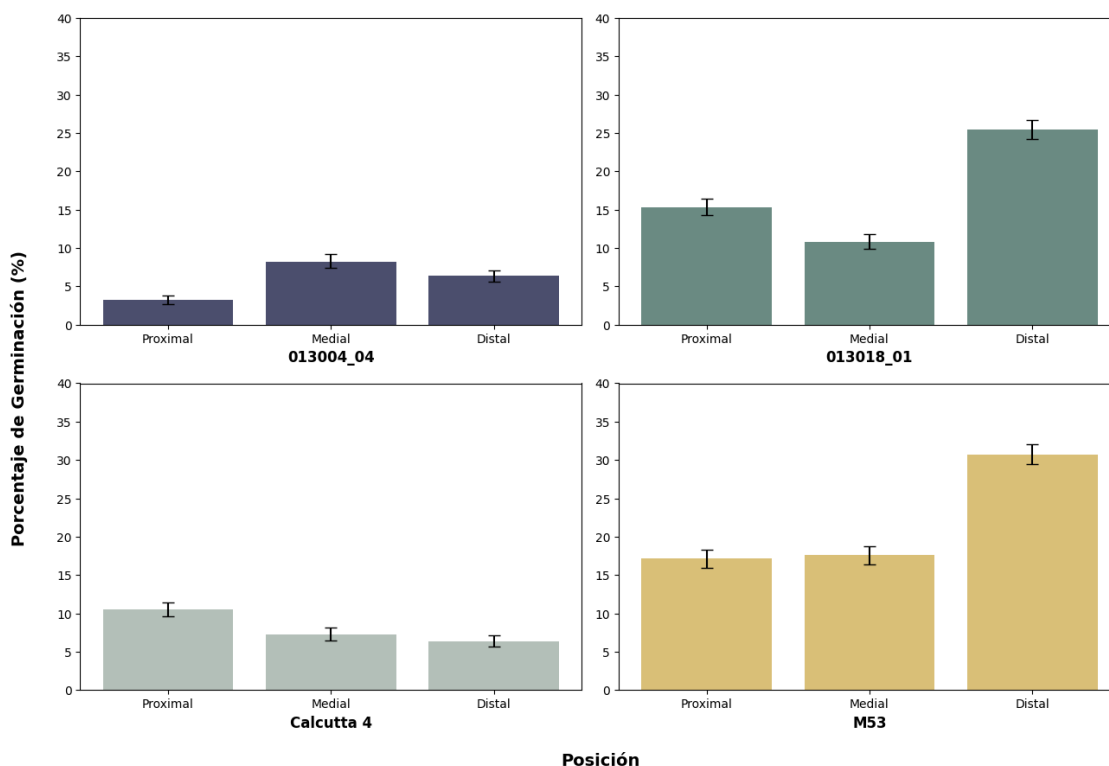
La germinación *in vitro* del polen se evaluó mediante una modificación del medio de Brewbaker y Kwack (1963), compuesto por 15 % sacarosa, 0.01 % ácido bórico, 0.01 % nitrato de potasio, 0.03 % nitrato de calcio y 0.02 % sulfato de magnesio, solidificado con 0.9 % agar y ajustado a pH 7.0. Los granos se incubaron en oscuridad a  $27 \pm 1$  °C durante 24 h y se observaron bajo estereoscopio Zeiss Stemi 508 (6×). Se consideraron germinados los granos con tubos polínicos mayores al diámetro del propio grano (Tuinstra y Wedel, 2000; Soares *et al.*, 2008). La viabilidad polínica se determinó por tinción con diacetato de fluoresceína (FDA 1 %), observándose 24 h después con microscopio Leica DM2000 LED (10×). Los granos viables presentaron exina intacta y protoplasma homogéneamente teñido, mientras que los no viables mostraron tinción débil o ausencia de contenido citoplasmático (Soares *et al.*, 2016).

## RESULTADOS

El análisis de desviación reveló que la posición floral dentro de la inflorescencia masculina influyó significativamente en la germinación del polen ( $p < 0.001$ ), con interacciones entre genotipo y posición ( $p < 0.001$ ). Los resultados evidenciaron una

respuesta diferencial según el tipo de cultivar evaluado, sin una tendencia general uniforme entre los genotipos evaluados.

En los diploides mejorados M53 y 013018-01, la germinación más alta se observó en la posición distal de la inflorescencia, con valores promedio de 30,6 % y 25,4 %, respectivamente. En contraste, el diploide silvestre ‘Calcutta 4’ presentó su máxima germinación (10,5 %) en la posición proximal, mientras que 013004-04 mostró su mejor desempeño en la posición medial (8,2 %). El cultivar Pisang Mas no presentó germinación, lo que significa que ningún grano de polen germinó en ninguno de los tratamientos evaluados (Figura 2).



**Figura 2.** Porcentaje de germinación del polen (%) según la posición de la inflorescencia masculina (proximal, medial y distal) en cuatro genotipos diploides (AA): 013004\_04, 013018\_01, Calcutta4 y M53. Las barras representan el error estándar de la media.

Todos los diploides evaluados presentaron porcentajes de viabilidad superiores al 90N %. Los genotipos 013018-01 y ‘Calcutta 4’ registraron los valores más altos (95,8 % y 95,7 %, respectivamente), sin diferencias significativas entre ellos, pero sí con respecto a los demás diploides evaluados.

## DISCUSIÓN

Las diferencias observadas en la germinación del polen entre posiciones florales se relacionan con variaciones fisiológicas en el desarrollo de las flores masculinas y la maduración del polen. Los mayores porcentajes de germinación en las posiciones distales, especialmente en los diploides M53 y 013018-01, coinciden con lo reportado por Goel *et al.* (2023), Gupta *et al.* (2024) y Raja *et al.* (2019), quienes asocian esta tendencia con una mayor exposición a la luz solar y fluctuaciones térmicas que favorecen la maduración polínica. La respuesta diferencial entre genotipos sugiere control genético en la regulación de la fertilidad del polen, concordando con Brunet *et al.* (2019), quienes destacaron que la expresión del potencial germinativo depende de la interacción genotipo  $\times$  estructura floral.

Los factores fisiológicos internos, como la regulación hormonal, podrían explicar las diferencias entre posiciones florales. Se ha demostrado que hormonas como el etileno y el ácido giberélico aumentan la viabilidad y la capacidad germinativa en etapas tardías de la floración, estimulando la síntesis de proteínas de choque térmico (HSPs) y promoviendo la maduración del polen (Salomón-Torres *et al.*, 2021; Breygina *et al.*, 2021; Role *et al.*, 2024). Estas evidencias respaldan que la posición distal representa un estado de mayor desarrollo y exposición hormonal, lo que contribuye a la superior germinación observada en determinados diploides de *Musa acuminata*.

## CONCLUSIONES

Los diploides M53 y 013018-01 presentan mayor germinación; 013004-04 es limitado y el cultivar ‘Pisang Mas’ no presenta germinación en ninguna de las posiciones evaluadas.

La posición floral óptima para la colecta de polen varía por genotipo; distal favorece a M53 y 013018-01; proximal a ‘Calcutta 4’; medial a 013004-04.

Los hallazgos brindan lineamientos operativos para cruzamientos con Cavendish y resaltan la necesidad de protocolos de conservación de polen.

## REFERENCIAS

- Brewbaker JL and Kwack BH. 1963. The essential role of calcium ion in pollen germination and pollen tube growth. *American Journal of Botany* 50(9), 859–865. <https://doi.org/10.2307/2439772>
- Breygina M, Klimenko E and Schekaleva O. 2021. Pollen germination and pollen tube growth in gymnosperms. *Plants* 10(7), 1301. <https://doi.org/10.3390/plants10071301>

- Brunet J, Ziobro R, Osvatic J and Clayton MK. 2019. The effects of time, temperature and plant variety on pollen viability and its implications for gene flow risk. *Plant Biology* 21(4), 715–722. <https://doi.org/10.1111/plb.12959>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2023. FAOSTAT: Agricultural data. Recuperado el 10 de julio de 2024, de <https://www.fao.org/faostat/>
- Goel K, Kundu P, Sharma P ND Zinta G. 2023. Thermosensitivity of pollen: A molecular perspective. *En Plant Cell Reports* (Vol. 42, Número 5, pp. 843–857). Springer. <https://doi.org/10.1007/s00299-023-03003-y>
- Gupta S, Novák O, Kulkarni MG, Doležalova I, Van Staden J and Doležal K. 2024. Unleashing the potential of biostimulants in stimulating pollen germination and tube growth. *Journal of Plant Growth Regulation* 2024, 1–32. <https://doi.org/10.1007/S00344-024-11346-3>
- Raja MM, Vijayalakshmi G, Naik ML, Basha PO, Sergeant K, Hausman JF and Khan PSSV. 2019. Pollen development and function under heat stress: From effects to responses. *Acta Physiologiae Plantarum* 41(4). <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2835-8>
- Role N, Sanita L, Toppi di Hasanuzzaman M, Khan S, Fatima Alvi A and Khan NA. 2024. Role of ethylene in the regulation of plant developmental processes. *Stresses* 4(1), 28–53. <https://doi.org/10.3390/STRESSES4010003>
- Salomón-Torres R, Krueger R, García-Vázquez JP, Villa-Angulo R, Villa-Angulo C, Ortiz-Uribe N, Sol-Uribe JA and Samaniego-Sandoval L. 2021. Date palm pollen: Features, production, extraction and pollination methods. *Agronomy* 11(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy11030504>
- Soares TL, E Silva SDO, Costa MAPDC, Dos Santos-Serejo JA, Souza ADS, Lino LSM, De Souza EH and De Jesus ON. 2008. *In vitro* germination and viability of pollen grains of banana diploids. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 8(2), 111–118. <https://doi.org/10.12702/1984-7033.V08N02A03>
- Soares TL, de Souza EH, Costa MAP de C, Silva S de O and dos Santos-Serejo JA. 2016. Viability of pollen grains of tetraploid banana. *Bragantia* 75(2), 145–151. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.328>
- Taliane LS, Everton H de S, Laecio FSS, Angelica P de CC, Sebastiao de O e S y Janay A dos SS. 2015. Effect of collection time on the viability of banana pollen grains. *African Journal of Biotechnology* 14(14), 1207–1214. <https://doi.org/10.5897/ajb2015.14449>
- Tuinstra MR and Wedel J. 2000. Estimation of pollen viability in grain Sorghum. *Crop Science* 40(4), 968–970. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.404968x>

## Selection-based breeding for the development of low-stature, fast, heavy-bunch banana cultivars

Navot Galpaz<sup>1\*</sup>, Gal Or<sup>2</sup>, Yael Bar-Noy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Northern Research and Development, MIGAL Galilee Research Institute, Kiryat Shmona 11016, Israel, <sup>2</sup>Western Galilee Research Station, Oshrat 25212

**\*Autor de correspondencia:**

Navot Galpaz  
navotg@migal.org.il

**Contribución:**

Artículo Científico

**Sección:**

Recursos genéticos y  
mejoramiento

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Galpaz N, Or G, Bar-Noy Y.  
2026. Selection-based breeding  
for the development of low-  
stature, fast, heavy-bunch  
banana cultivars. *Acorbat  
Revista de Tecnología y  
Ciencia* 3(1): 132  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26132>

### ABSTRACT

The development of improved cultivars is a key driver of progress in agriculture. Classical breeding through hybridization is rare in banana, as most commercial cultivars are sterile. Instead, selection-based breeding—identifying and propagating superior individuals within existing cultivars—offers a practical and efficient alternative for crop improvement. Our work focuses on developing improved selections of the industry-standard cultivar Grand Nain, targeting three key traits: reduced plant height, a shorter life cycle, and heavier bunches—traits that reduce labor costs and enhance productivity. Three representative selections are highlighted: Tiny-IL, combining reduced stature (42 cm, -)13.3%( less than Grand Nain) with high bunch weight; Barak, characterized by a shorter growth cycle, flowering 15 days earlier than Grand Nain and exhibiting a PC-to-R1 ratio of 0.75 compared with 0.21 in Grand Nain; and Goliath, producing exceptionally heavy bunches, with an increase of 11.5 kg (+20.8%) in bunch weight. In parallel, we developed two superior selections from TR4-tolerant Taiwanese clones, featuring a significantly shorter life cycle and heavy bunches. However, field trials revealed reduced tolerance compared with the parental lines, suggesting a trade-off between accelerated growth and pathogen resistance. Currently, 22 promising Grand Nain selections are undergoing large-scale, multi-year clonal trials across diverse environments. These efforts aim to deliver improved, high-yielding cultivars adapted to the evolving challenges of global banana production.

**Key words:** Selection-based breeding, Grand Nain, Low stature, Short life cycle, Heavy bunch

### RESUMEN

El desarrollo de cultivares mejorados es un factor clave del progreso agrícola. En banano, el mejoramiento clásico mediante cruzamientos es poco común, ya que la mayoría de los cultivares comerciales son estériles. En su lugar, el mejoramiento basado en selección —la identificación y propagación de plantas individuos superiores dentro de cultivares existentes— ofrece una alternativa práctica y eficiente para mejorar el cultivo. Nuestro trabajo se centra en desarrollar selecciones mejoradas del cultivar estándar de la industria, Grand Nain, enfocadas en tres rasgos principales: menor altura de planta, ciclo de vida más corto y racimos más pesados, características que reducen los costos de mano de obra y aumentan la productividad. Se destacan tres selecciones representativas: Tiny-IL, que combina una reducción de 42 cm (-13,3 %) en altura respecto a Grand Nain con alto peso de racimo; Barak, caracterizada por un ciclo más corto, con floración 15 días antes que Grand Nain y una relación PC-R1 de 0,75 frente a 0,21 en Grand Nain; y Goliath, que produce racimos excepcionalmente pesados, con un incremento de 11,5 kg (+20,8 %). En paralelo, se desarrollaron dos selecciones superiores a partir de clones taiwaneses tolerantes a TR4, con ciclos más cortos y racimos pesados. Sin embargo, los ensayos de campo mostraron menor tolerancia que las líneas parentales, lo que sugiere una compensación entre crecimiento acelerado y resistencia a patógenos. Actualmente, 22 selecciones prometedoras de Grand Nain se evalúan en ensayos clonales multianuales y en diversos ambientes, con el objetivo de generar cultivares mejorados y productivos adaptados a los desafíos cambiantes de la producción mundial de banana.

**Keywords:** Crianza basada en la selección, Grand Nain, Baja estatura, Ciclo de vida corto, Racimo pesado



## INTRODUCTION

Banana (*Musa* spp.) is one of the most important fruit crops globally, providing a major source of calories and income for millions of people across tropical and subtropical regions (FAO, 2025). Despite its economic and nutritional significance, genetic improvement in banana remains challenging due to the sterility, triploidy, and narrow genetic base of most commercial cultivars. Conventional breeding through hybridization—an essential driver of crop improvement in other species—is therefore rarely feasible in banana (Cheng *et al.*, 2024). As a result, selection-based breeding has emerged as a practical and powerful approach for banana improvement. This strategy focuses on identifying naturally occurring variants or somaclonal selections that express superior agronomic performance, such as improved tolerance to diseases, reduced plant height, shortened growth cycle, enhanced bunch weight, and better fruit quality (Ferreira *et al.*, 2023). Unlike conventional breeding, selection-based improvement capitalizes on genetic variation within vegetatively propagated populations, allowing progress even in the absence of sexual recombination. Although bananas (*Musa* spp.) display broad genetic diversity across wild and cultivated accessions (Christelová *et al.*, 2017), the commercial banana industry is largely based on a narrow genetic basis, dominated by the Cavendish subgroup, particularly the cultivars Williams and Grand Nain. This genetic uniformity has created a global monoculture that is highly vulnerable to biotic and abiotic stresses, including emerging diseases such as Fusarium wilt Tropical Race 4 (TR4) and the increasing impacts of climate change. The heavy reliance on a few closely related genotypes underscores the urgent need to develop new banana cultivars with improved agronomic performance, enhanced resilience, and broader genetic diversity to ensure sustainable production and market stability. The present study describes the implementation of a selection-based breeding program for banana, focusing on the enhancement of Grand Nain. Through multi-year evaluations and comparative trials, we aim to demonstrate the potential of this approach to deliver shorter, faster, and heavier-bunches banana lines suitable for diverse growing environments.

## MATERIALS AND METHODS

### Plant material and experimental sites

The selection-based breeding activity was conducted using *Musa acuminata* cultivars of the AAA genomic group. Two independent breeding tracks were established: (i) selections from the commercial cultivar Grand Nain, and (ii) selections from Taiwanese TR4-tolerant clones 218 and 247. Experiments were conducted in Northern Israel. Grand Nain selections in the Western Galilee (Kibbutz Mezuba,

33°03'50.2"N, 35°08'45.2"E) and Taiwanese TR4-tolerant selections in the Jordan Valley (Kibbutz Ein Gev, 32°46'43.0"N, 35°38'22.7"E). The climate in both regions is subtropical, characterized by warm, dry summers and cold winters, with annual maximum and minimum temperatures of 35–40°C and 2–4°C, and 400–500 mm of rainfall concentrated between November and March.

### **Selection Process and Propagation**

In each selection plot, all plants were visually screened for at least three crop cycles to identify superior agronomic performance. Plants exhibiting desirable traits—reduced height (<290 cm), a shorter growth cycle (flowering  $\geq 10$  days earlier than Grand Nain), increased bunch weight (>35 kg), and improved plant architecture (open, well-spaced hands)—were tagged. From each tagged plant, 5–10 follower plants were collected and propagated via tissue culture (Ginosar Agro, Kibbutz Ginosar, Israel). Each selected line was multiplied to produce uniform clonal replicates for subsequent clonal evaluation. The initial screening encompassed ~20,000 Grand Nain plants and 200 TR4-tolerant Taiwanese clone plants (218 and 247).

### **Field Evaluation and Experimental Design**

Clonal evaluations were conducted in two phases. Phase I was an observational trial with a single bordered replication, comprising 18 measured plants per line. Phase II employed a randomized complete block design with four replicates, each consisting of 24 measured plants (96 plants per genotype). Phase II trials were established in August 2022 (TR4-tolerant clone selections) and August 2024 (Grand Nain selections). All studies were conducted in 6-m-high greenhouse plots. Tissue-cultured plants (40–50 cm, grown in 1.2-L pots) were used for planting. Spacing was 3 m between mats within rows and 4 m between rows, with three plants per mat, giving a density of 2,500 plants/ha.

Plots were fertigated via a drip system with 300 kg N/ha/year (as  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), 450 kg  $\text{K}_2\text{O}$ /ha/year, and 50 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ /ha/year. Irrigation was applied daily during the dry season (April–November), totaling approximately 1700 mm annually.

### **Data Collection and Statistical Analysis**

The following parameters were recorded to assess horticultural performance: pseudostem height and circumference measured 1 m above ground after bunch emergence; bunch emergence and harvest dates; number of hands per bunch; bunch weight; and finger traits, including weight and length of the middle finger from the outer whorl of the third basal hand. For TR4 resistance (Taiwanese TR4-tolerant clone selections only), external Fusarium wilt symptoms were visually evaluated monthly using a 1–5 scale (1 = symptom-free, 5 = dead).

Statistical analyses were performed using JMP 13 software (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Phase I data were analysed using two-sample t-tests, and Phase II using analysis of variance (ANOVA) under an RCBD model with block treated as a random effect.

## RESULTS AND DISCUSSION

Grand Nain Selections: Twenty-two individual plants exhibiting desirable agronomic traits were identified through multi-year visual field screening of approximately 20,000 plants. The main selection criteria included reduced plant height (two selections), a shorter life cycle (six selections), and increased bunch weight (fourteen selections). Plants showing potential superiority for one or more of these traits were propagated through tissue culture and established in a small-scale clonal validation (Phase I) plot designed as an observational trial to verify the initial field observations and genetic stability. The following section presents results from the first production cycle (parent crop) for three representative selections, each expressing one of the key target traits. Tiny-IL represents the low-stature selection group. This line combines a 42 cm (13.5%) reduction in plant height relative to Grand Nain, with a 6.9 cm (10.4%) increase in pseudostem diameter (Table 1, Figure 1a). The reduced plant height facilitates field management, lowers labor costs, and decreases the risk of wind damage or pseudostem breakage. The smaller plant size and reduced canopy area allow for higher planting density. Combined with a slightly heavier bunch weight (Table 1, Figure 2b), these traits indicate strong potential for improved yield efficiency per unit area. Finger length and weight in Tiny-IL were comparable to those of Grand Nain (Table 1).

**Table 1.** Comparative performance of the selection Tiny-IL relative to the commercial control Grand Nain in the parent crop (Phase I; observational trial; n = 18 plants per line). Different letters within the column indicate statistically significant differences according to a t-test ( $p < 0.05$ ).

Genotype	Pseudostem height (cm)	Pseudostem circumference (cm)	Shooting date (dd/mm/yyyy)	Harvest date (dd/mm/yyyy)	Hand number in bunch	Bunch weight (kg)	Finger length (cm)	Finger weight (g)
Grand Nain	313a	66.4b	27/07/2023	12/10/2023	12.7	43.8	21.8	186
Tiny-IL	271b	73.3a	23/07/2023	25/10/2023	12.8	45.2	22.1	179



**Figure 1.** Comparison of plant height and bunch development between Grand Nain (left) and Tiny-IL (right): (a) seven months and (b) fourteen months after planting.

Barak represents the “short life cycle” selection group. It flowered 15 days earlier and was harvested 39 days before Grand Nain (Table 2). Moreover, its PC-to-R1 ratio—representing the number of daughter-plant bunches harvested within the same year as the mother plant—was three times higher than the industry standard (Table 2), indicating a potentially high harvest index and annual yield capacity. Despite its smaller stature and reduced pseudostem circumference, Barak produced bunches and fingers comparable in weight and size to those of Grand Nain (Table 2). Goliath represents the “big-bunch” selection group. The plants are large, with tall and robust pseudostems (408 cm in height and 81.6 cm in circumference), corresponding to 63 cm and 10.1 cm more than Grand Nain, respectively (Table 2), indicating vigorous vegetative growth. Goliath produced the heaviest bunches (55.0 kg), which is 9.5 kg—or 20.8%—greater than Grand Nain, and the highest number of hands per bunch (14.5), surpassing the standard cultivar by 2 hands. Although it produced more hands, finger length and weight were comparable to Grand Nain (Table 2), confirming that the yield advantage resulted primarily from an increased number of fruits rather than enlargement of individual fruits.

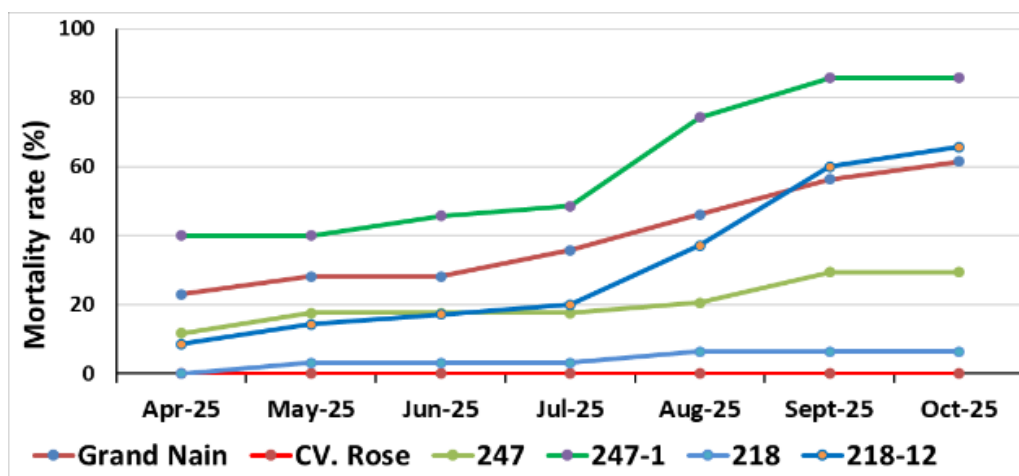
**Table 2.** Comparative performance of the selections Barak and Goliath relative to the commercial control Grand Nain in the parent crop (Phase I; observational trial; n = 18 plants per line). Different letters within a column indicate statistically significant differences according to a t-test ( $p < 0.05$ ).

Genotype	Pseudostem height (cm)	Pseudostem circumference (cm)	Shooting date (dd/mm/yyyy)	Harvest date (dd/mm/yyyy)	Hand number in bunch	Bunch weight (kg)	Finger length (cm)	Finger weight (g)	PC to R1 ratio
Grand Nain	345ab	71.5b	14/07/2024b	16/11/2024c	12.5ab	45.5b	23.8	235	0.21
Barak	316b	68.7c	29/06/2024a	08/10/2024a	11.5b	46.8b	22.3	210	0.75
Goliath	408a	81.6a	24/07/2024b	30/10/2024b	14.5a	55.0a	23.6	212.0	0

**Taiwanese TR4-tolerant clones** .Through selection within the TR4-tolerant Taiwanese clones 218 and 247, two superior lines—218-12 and 247-1—were developed, exhibiting markedly shorter production cycles and heavier bunches than their parental genotypes. Flowering occurred 27 and 32 days earlier, and harvest 33 and 49 days earlier, respectively, compared with the parental lines. Bunch weight increased by 11.6 kg (+50%) in 218-12 and 13.7 kg (+72%) in 247-1, leading to yield gains of over 60%. These results highlight the efficiency of selection-based breeding for improving productivity and shortening the growth cycle within existing banana cultivars.

**Table 3.** Agronomic performance of the TR4 tolearnt clones 218 and 247 and their improved.

Genotype	Pseudostem height (cm)	Pseudostem circumference (cm)	Shooting date (dd/mm/yyyy)	Harvest date (dd/mm/yyyy)	Hand number in bunch	Bunch weight (kg)	Finger length (cm)	Finger weight (g)	Bunches per ha.	Yield (ton/ha.)
Grand Nain	287b	62.9b	28/07/2023a	23/11/2023a	11.1ab	31.8a	20.7ab	175ab	2083a	65.7a
218	277b	62.2b	31/08/2023b	07/01/2024b	10.3ab	22.9b	19.6ab	165ab	1583b	35.3b
218-12	298b	70.2a	30/07/2023a	19/11/2023a	10.8ab	34.5a	21.9a	194a	1666b	56.7ab
247	330a	62.8b	29/08/2023b	11/01/2024b	9.5b	19.0b	18.5b	142b	1875ab	37.2b
247-1	354a	67.9a	02/08/2023a	09/12/2023ab	11.9a	32.7a	20.9ab	196a	1875ab	61.2a



**Figure 2.** Monthly progression of plant mortality (%) among banana genotypes under TR4-infested field conditions between April and October 2025. Each point represents the mean of 32 plants per genotype.

Selections 218-12 and 247-1 under TR4-free field conditions. N=96 plants. Different letters within a column indicate statistically significant differences according to one-way ANOVA ( $p < 0.05$ ).

The new clones and their parental lines were planted in August 2024 in a TR4-infested plot to assess Panama disease tolerance, alongside Grand Nain (susceptible) and Cv. Rose (resistant) controls. By October 2025, mortality reached 62% in Grand Nain and 0% in Cv. Rose. The parental clones 218 and 247 showed partial tolerance (6% and 29% mortality), whereas the selected lines 218-12 and 247-1 were more susceptible, with 66% and 86% mortality, respectively (Figure 2). The unexpected susceptibility of the selected lines 218-12 and 247-1 compared with their parental clones may reflect a trade-off between rapid growth and disease tolerance (Huot et al., 2014, Zaret *et al.*, 2024). Moreover, the prevailing subtropical environmental conditions during the trial—characterized by high air and soil temperatures—likely created an optimal environment for rapid pathogen proliferation and symptom expression.

## CONCLUSIONS

Collectively, these findings demonstrate the capacity of selection-based breeding to rapidly generate distinct and genetically stable phenotypes—Tiny-IL for reduced stature, Barak for rapid cycling, and Goliath for heavy bunch production—highlighting

the effectiveness of this approach in diversifying the banana industry with improved cultivars.

Data collection will continue for at least five successive production cycles in Phase II to validate the observed trends. Given the strong environmental influence on banana performance, further evaluation across diverse tropical and subtropical regions is essential to confirm the stability and adaptability of the selected lines. The TR4-tolerant Taiwanese selections project illustrates a trade-off between accelerated growth and pathogen resistance. Nevertheless, evaluating these improved selections in environments with slower disease progression remains worthwhile.

## REFERENCES

- Cheng C, Wu S and Deng G. 2024. Recent advances and future directions in banana molecular biology and breeding. *Molecular Horticulture*, 4, 42.
- Christelová P, De Langhe E, Hřibová E, Čížková J, Sardos J, Hušáková M, *et al.* 2017. Molecular and cytological characterization of the global *Musa* germplasm collection provides insights into the treasure of banana diversity. *Biodiversity and Conservation*, 26(4), 801-824.
- Ferreira MDS, Rocha ADJ, Nascimento FDS, Oliveira WDDS, Soares JMDS, Rebouças TA, *et al.* 2023. The role of somaclonal variation in plant genetic improvement: A systematic review. *Agronomy*, 13(3), 730.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2025. *Banana Market Review 2024 – Preliminary Results*. Rome: FAO.
- Huot B, Yao J, Montgomery BL and He SY. 2014. Growth–defense tradeoffs in plants: a balancing act to optimize fitness. *Molecular plant*, 7(8), 1267-1287.
- Zaret M, Kinkel L, Borer ET and Seabloom EW. 2024. Plant growth–defense trade-offs are general across interactions with fungal, insect, and mammalian consumers. *Ecology*, 105(5), e4290.

## TR4-Resistant Bananas: Securing the future of the banana industry

Marlon Enrique López<sup>1\*</sup>, Roberto Antonio Young<sup>2</sup>, Naomi Abbott<sup>3</sup>, Brent Wilson<sup>4</sup>, Luis Falcon<sup>5</sup> and Frans Wielemaker<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Honduran Foundation for Agricultural Research (FHIA), <sup>2</sup>Dole Food Company, <sup>3</sup>North Queensland Banana Research (NQBR),

<sup>4</sup>Mackay Banana Company, <sup>5</sup>AgroAmerica

**\*Autor de correspondencia:**

Marlon Enrique López  
marlon\_lopez@fhia-hn.org

**Contribución:**

Artículo Científico

**Sección:**

Recursos genéticos y  
mejoramiento

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

López ME, Young RA, Abbott N, Wilson B, Falcon L and Wielemaker F. 2026. TR4-Resistant Bananas: Securing the future of the banana industry. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 133  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26133>

### ABSTRACT

The imminent threat *Fusarium oxysporum* f. sp. *cabense* Tropical Race 4 (FOC-TR4), along with the persistence of Black Sigatoka, requires a comprehensive response to safeguard global banana production. In this context, the Musa Breeding Company (MBC) consortium has formed a strategic alliance that has yielded significant results after 9 years of research. By utilizing advanced techniques such as pollination, embryo rescue, and a robust bioassay program under controlled (Stellenbosch) and field conditions (Australia), 4 immune hybrids and 28 highly resistant hybrids to FOC-TR4 have been identified from a total of 117 evaluated hybrids. These new hybrids not only exhibit high resistance but also preserve the agronomic and performance qualities characteristic of Cavendish bananas. They are projected to be commercially available between 2027 and 2028, representing a crucial advance for resilience, economic sustainability, and food security in the global banana industry.

**Keywords:** FOC-TR4, Mejoramiento genético, Híbridos de banano, Cultivo convencional

### RESUMEN

La amenaza inminente del *Fusarium oxysporum* f. sp. *cabense* Raza 4 Tropical 4 (FOC-R4T) y la persistencia de la Sigatoka Negra exigen una respuesta integral para salvaguardar la producción de bananos a nivel mundial. En este sentido, el consorcio Musa Breeding Company (MBC) ha formado una alianza estratégica que ha mostrado resultados significativos después de 9 años de investigación. Mediante el uso de técnicas avanzadas de polinización, rescate de embriones y un programa robusto de bioensayos en condiciones controladas (Stellenbosch) y de campo (Australia), se ha logrado identificar 4 híbridos inmunes y 28 altamente resistentes al FOC-R4T de un total de 117 híbridos evaluados. Estos nuevos híbridos no solo presentan una alta resistencia, sino que también mantienen las cualidades agronómicas y de rendimiento propias del banano Cavendish. Se proyecta que estarán disponibles comercialmente entre 2027 y 2028, lo que representa un avance crucial para la resiliencia, sostenibilidad económica y seguridad alimentaria de la industria bananera global.

**Keywords:** FOC-TR4, Genetic Improvement, Banana hybrids, Conventional Breeding



## INTRODUCTION

Bananas are a key food product worldwide, being Cavendish varieties the most important in the export market, representing approximately 50% of the 95% of global trade (Garcia-Bastidas *et al.*, 2022). The Cavendish varieties emerged after of the decline of Gros Michel, which was affected by the *Fusarium* race 1 fungus. Although Cavendish is resistant to this strain, a new variant called Tropical Race 4 (TR4) has begun to impact its production since its emergence between 1960 and 1970. FOC-TR4 has been reported in 21 countries (Nguyen *et al.*, 2025), including Colombia, Peru, and Venezuela, with rigorous analyses currently underway in Ecuador to identify its presence. Given the ineradicable presence of this fungus, the situation is critical, gradually affecting banana plantations. To combat this threat, the Musa Breeding Company (MBC) has been established as a consortium focused on genetic improvement by means conventional breeding. This effort involves leading companies in banana production and export (Dole Food Company, NQBR, AgroAmerica), and FHIA. Its goal is to develop Cavendish-type banana hybrids that are resistant to FOC-TR4 and Black Sigatoka, thereby ensuring sustainable banana production worldwide.

## MATERIAL AND METHODS

### Parental material and breeding strategy

Cavendish tetraploid mother's and improved diploids created by FHIA were used for the consortium's Banana Breeding Program. The parental material used underwent a pre-breeding process to obtain  $4n$  and  $2n$  materials. The main objective was to create Cavendish hybrids that are resistant to FOC-TR4 and Black Sigatoka, with good taste and yield.

### Hand pollination

Our banana and plantain breeding program is entirely conventional. Between 2016 and 2025, approximately 15 million banana fingers were hand pollinated. Each morning from 6:00 to 10:00 a.m. fresh banana male structures were collected to pollinate individual female flowers. Each pollinator had a set number of pollinations to perform daily based on breeding strategies.

### Embryo rescue

After pollination, banana bunches were harvested carefully and ripened separately per crossing strategy. Every banana bunch was peeled, and water was added to a container to soften the pulp. The next day, the pulp was separated from the seeds using a centrifuge machine. Then, banana seeds were dried and stored for the embryo rescue process. All seeds were disinfected and opened under aseptic conditions. Each

embryo was placed in culture medium for germination, and three weeks later, changed to new medium for embryo development and rooting. The rescue procedure is kept at a controlled temperature (23 °C) in the growth room and lasts for about 8 weeks. Approximately 220,000 seeds have been processed, and we have obtained 105,000 embryos and 53,000 hybrids, of which 163 have been selected for evaluation.

### **Evaluation and selection of new hybrids**

After each embryo had rooted in the growth room, plants were transferred to the greenhouse and placed in pots with soil mixed with organic matter and nutrients following a soil lab recommendation. After 8-10 weeks, plants were transferred to the shade house for hardening before field planting for evaluation. After 8-10 weeks of hardening, the plants are taken to the field for phenotypic characterization. For the selection of candidate hybrids, the plants were evaluated at shooting and harvest. Finally, the taste, one of the most important parameters at this stage, was assessed. Hybrids that meet the commercial parameters for plant height, bunch weight, Black Sigatoka tolerance, and taste were selected for further evaluation. For each hybrid, Specific and Detailed evaluation was conducted using a Randomized Complete Block Design (RBD).

### **TR4 pot trial evaluations**

All selected hybrids underwent an evaluation process against FOC-TR4. Since the pathogen is not present in Honduras, the evaluations were conducted at Stellenbosch University in South Africa, following the methodology of Dr. Altus Viljoen (Ndayihanzamaso *et al.*, 2022).

### **TR4 field trial evaluations**

All selected hybrids were propagated for further FOC-TR4 screening in the Northern Territory in Australia, where they used FOC-TR4-contaminated soils for disease evaluation. In this test, plants were processed through the Australian Government's phytosanitary quarantine facilities. After release, plants went to a greenhouse for hardening before being planted in the field. In the field, plants were handled according to the methodology used by Mintoff *et al.*, 2021.

### **Pre-commercial and Plant Breeder Rights process**

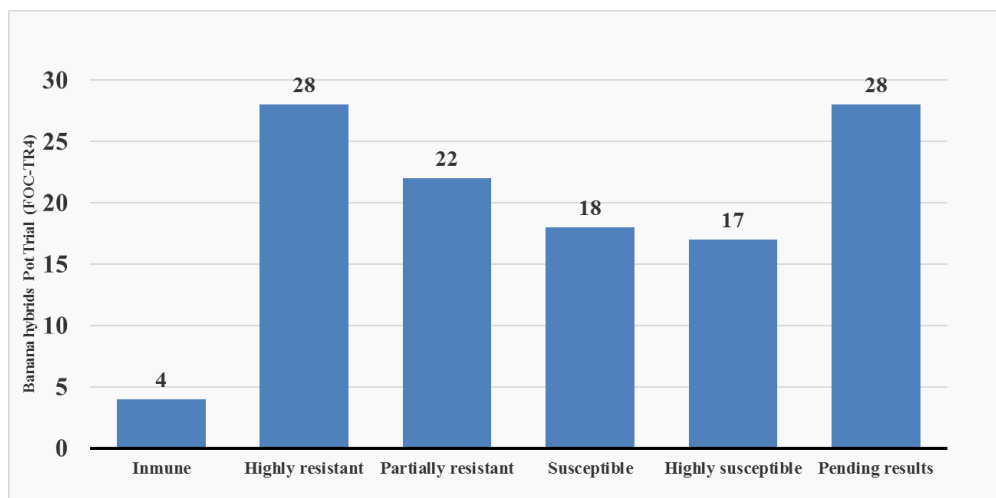
Banana hybrids that meet the characteristics of resistance to FOC-TR4, resistance to Black Sigatoka, good bunch weight, and excellent taste were moved on to the pre-commercial stage, where conditions of yield, boxes/bunch, packaging, agronomic performance, green and yellow life, and acceptance by the final consumer were evaluated. At the same time, data was collected to apply for plant breeders' rights

(PBR), in accordance with the requirements of the International Union for the Protection of New Varieties of Plants (UPOV).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Pot Trial results

Conducting pot trials has allowed us to assess the success of our breeding program in creating new banana hybrids resistant to FOC-TR4. We have evaluated 117 hybrids (all types), of which four are immune, 28 are highly resistant, 22 are partially resistant, 18 are susceptible, 17 are highly susceptible, and 28 have pending resistance scores (Figure 1).



**Figure 1.** Response of banana hybrids to artificial inoculations of FOC-TR4 in pot trials.

### Pot and Field Trials

The purpose of comparing the pot trial and field trial results is to see if the initial pot trial data can help identify FOC-TR4-resistant hybrids for further evaluations in the field. The comparison in table 1 shows that hybrids with high and moderate resistance in the pot trial also behaved similarly in the field (A sample of the total evaluated hybrids). However, some hybrids that seemed susceptible in the pot trial turned out to be more tolerant to the disease when tested in the field.

**Table 1.** Results of banana hybrids against FOC-TR4 in pot and field trials.

Hybrid ID	Rhizome Discoloration Index (RDI) Stellenbosch University South Africa (Pot Trials)	Percentage of Plants with Internal Symptoms (R1) (Death or Harvest) (Northern Territory Australia) (Field Trial)
Positive control	4.8	51.1
Negative control	1	?
H1	1,5	0
H2	1,6	0
H3	3,6	0
H4	2	26.6
H5	3,2	42.3
H6	3,5	0
H7	2,5	57.3
H8	2,7	0
H9	2,6	0
H10	1,1	0
H11	3,8	33.9
H12	2,8	23.4

### **Cavendish promising results**

The results on Cavendish-type hybrids resistant to FOC-R4T are impressive; some are already in the pre-commercial stage, and data is being collected for patent and PBR filing. Their yield, bunch conformation, finger shape, plant height, and flavor are like those of commercially available Cavendish varieties. Another important characteristic is the genetic resistance to Black Sigatoka; in this regard, some hybrids exhibit high tolerance to this disease, in addition to their resistance to FOC-TR4. The photos below show a comparison of the CAV-H1 hybrid TR4- resistant, which has similar characteristics to the commercial Cavendish (CAV) variety (Figure 2A). The following photo shows four Cavendish-type hybrids under evaluation process (CAV-H2 to CAV-H5) (Figure 2B).



**Figure 2.** Cavendish-type banana hybrids under evaluation for commercial release.

### **Gros Michel promising results**

Among the breeding strategies used, tetraploid Gros Michel-type parents (GM) were included to obtain improved hybrids with genetic resistance to FOC-TR4 and Black Sigatoka. The photos below show (Figure 3) promising hybrids currently being field evaluated. The flavor, bunch size, and finger size of new GM-derived hybrids have commercial potential.



**Figure 3.** Gros Michel-type banana hybrids under evaluation for commercial release.

### Exotic bananas promising results

As part of genetic recombination in the genetic improvement process, we have selected some banana hybrids that are not Cavendish-like but have excellent characteristics for niche markets, such as Manzano-type (MT) (Figure 4A). Orange pulp high beta-carotene content (BET) (Figure 4B) TR4 resistant.



**Figure 4.** Exotic bananas under evaluation for commercial release.

## CONCLUSIONES

After nine years of dedicated work, the MBC's banana breeding program can showcase promising results as alternatives to Cavendish in response to the FOC-TR4 threat.

The first hybrids with genetic resistance to FOC-TR4 and Black Sigatoka are expected to be available between 2027 and 2028.

In addition to Cavendish-type banana hybrids, MBC will offer Gros Michel and exotic bananas resistant to FOC-TR4 and Black Sigatoka.

## REFERENCIAS

- García-Bastidas A, Arango-Isaza R, Rodríguez-Cabal H, Seidl F, Cappadona G, Segura R, Kema G. 2022. Induced resistance to Fusarium wilt of banana caused by Tropical Race 4 in Cavendish cv Grand Naine bananas after challenging with avirulent *Fusarium* spp. Plos one, 17(9), e0273335.
- Mintoff S, Nguyen T, Kelly C, Cullen S, Hearnden M, Williams R, Tran-Nguyen L. 2021. Banana cultivar field screening for resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in the Northern Territory. Journal of Fungi, 7(8), 627.
- Ndayihanzamaso P, Bothma S, Mostert D, Mahuku G, Viljoen A. 2022. An optimized greenhouse protocol for screening banana plants for Fusarium wilt resistance. Efficient Screening Techniques to Identify Mutants with TR4Resistance in Banana, 65, Springer.
- Nguyen C, Nguyen T, Mostert D, Viljoen A, Kearsley E, Blomme G. 2025. The evolving threat of Fusarium Wilt TR4 to small-scale mixed cultivar banana production in the Red River Basin of Northern Vietnam. Journal of Fungi, 11(9), 653.

## Innovative banana improvement at rahan meristem: addressing TR4, Black Sigatoka and climate change

Oshry Markovich\*, Eli Khayat

Rahan Meristem (1998) Ltd., Rosh-Hanikra, Israel

**\*Autor de correspondencia:**

Oshry Markovich  
oshrym@rahan.co.il

**Contribución:**

Artículo Científico

**Sección:**

Recursos genéticos y  
mejoramiento

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Markovich O, Khayat E. 2026.  
Innovative banana  
improvement at rahan  
meristem: addressing TR4,  
Black Sigatoka and climate  
change. *Acorbat Revista de  
Tecnología y Ciencia* 3(1): 134  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26134>

### ABSTRACT

The global banana industry faces major threats from *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 (TR4), Black Sigatoka disease (BLS), and increasing abiotic stresses driven by climate change. Most commercial triploid banana cultivars are sterile and parthenocarpic, limiting conventional breeding approaches. Rahan Meristem has developed an integrated biotechnological strategy combining mutation breeding and genome editing to introduce genetic variability and improve elite Cavendish clones. Mutant lines resistant to TR4 were generated and evaluated in multi-location field trials in the Philippines, Colombia, and Israel. Selected resistant lines showed over 90% survival in heavily infected fields while maintaining agronomic performance comparable to commercial controls. In parallel, CRISPR-based genome editing was applied to modify banana genes associated with susceptibility to BLS and tolerance to abiotic stresses such as heat, drought, and salinity. Edited plants demonstrated enhanced tolerance traits and were officially classified as non-GMO by Philippine regulatory authorities, enabling field validation. These results demonstrate that modern biotechnological approaches can rapidly deliver disease-resistant and climate-resilient banana varieties suitable for tropical production systems.

**Keywords:** Banana, Fusarium TR4, Black Sigatoka, Genome editing, Climate change

### RESUMEN

La industria bananera mundial se enfrenta a amenazas importantes derivadas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical (R4T), la enfermedad de la Sigatoka Negra (SN) y el aumento de los estreses abióticos provocados por el cambio climático. La mayoría de los cultivares comerciales de banano triploide son estériles y partenocárpicos, lo que limita los enfoques de mejoramiento convencional. Rahan Meristem ha desarrollado una estrategia biotecnológica integrada que combina el mejoramiento por mutación y la edición del genoma para introducir variabilidad genética y mejorar clones élite de Cavendish. Se generaron líneas mutantes resistentes a R4T y se evaluaron en ensayos de campo en múltiples localidades de Filipinas, Colombia e Israel. Las líneas resistentes seleccionadas mostraron una supervivencia superior al 90 % en campos altamente infectados, manteniendo un rendimiento agronómico comparable al de los controles comerciales. Paralelamente, se aplicó la edición del genoma basada en CRISPR para modificar genes del banano asociados con la susceptibilidad a la SN y la tolerancia a estreses abióticos como el calor, la sequía y la salinidad. Las plantas editadas demostraron rasgos de tolerancia mejorados y fueron clasificadas oficialmente como no transgénicas por las autoridades reguladoras Filipinas, lo que permitió su validación en campo. Estos resultados demuestran que los enfoques biotecnológicos modernos pueden generar



rápidamente variedades de banano resistentes a enfermedades y adaptadas al clima, aptas para los sistemas de producción en los trópicos.

**Palabras clave:** Banano, Fusarium R4T, Sigatoka negra, Edición genómica, Cambio climático

## INTRODUCTION

Banana (*Musa* spp.) production is increasingly threatened by Fusarium wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 (TR4), Black Sigatoka disease (BLS), and climate-change-driven abiotic stresses. Commercial banana production relies on genetically uniform, sterile triploid Cavendish cultivars, severely limiting conventional breeding options. TR4 is a soil-borne pathogen that causes long-term field contamination and plant death, with no effective chemical control, making host resistance essential. BLS significantly reduces photosynthetic leaf area and yield, requiring intensive fungicide use with increasing resistance risks. In parallel, rising temperatures, increased drought frequency, and soil salinization are reducing yield stability in major banana-producing regions of Latin America (WMO-No. 1330).

Modern biotechnological approaches, including mutation breeding and genome editing, provide effective tools to overcome genetic bottlenecks in banana. This study presents Rahan Meristem's integrated strategy to develop Cavendish-based banana lines with durable TR4 resistance, high tolerance to BLS, and enhanced resilience to climate-related stresses.

## MATERIALS AND METHODS

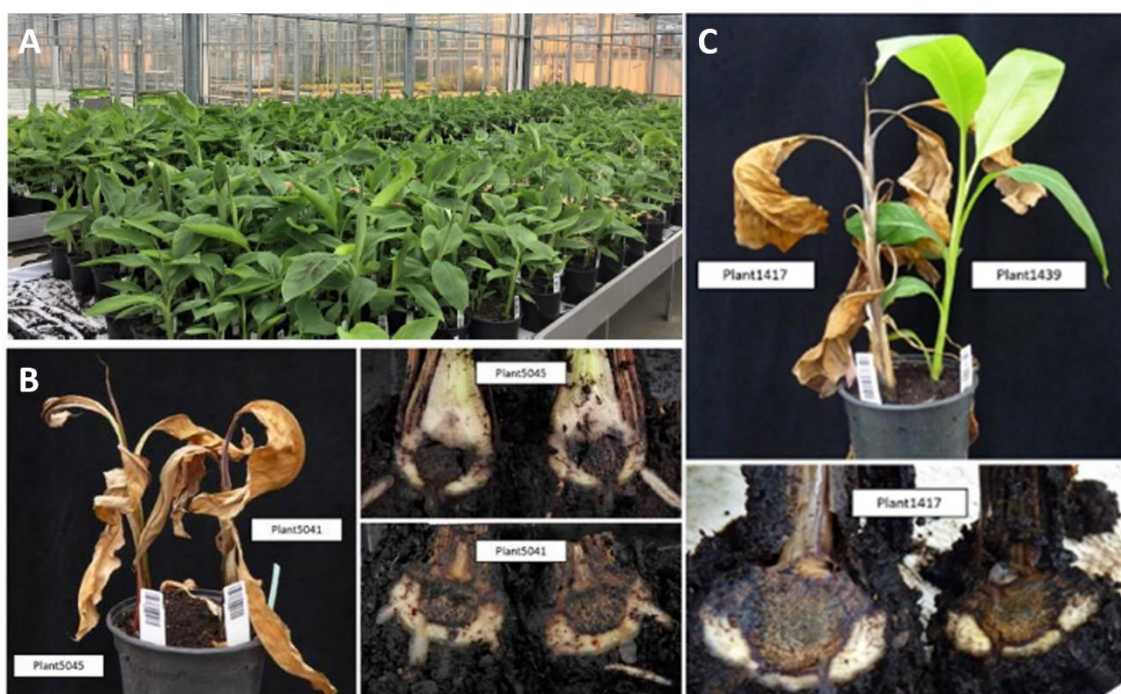
Mutation breeding for TR4 resistance was conducted according to US patent US12082544B2 using elite Cavendish (GAL) and Valery clones. Mutant plants were screened under controlled TR4 pressure and subsequently evaluated in multi-location field trials in the Philippines and Colombia.

Genome editing was performed using CRISPR/Cas systems on embryogenic cell suspensions derived from the GAL cultivar, following published banana genome-editing protocols (Guy et al; 2024). Independent single-gene edits were generated targeting genes associated with BLS susceptibility and abiotic stress tolerance. Edited plants were validated by PCR and sequencing prior to phenotypic evaluation and field trials, conducted under regulatory approval in the Philippines.

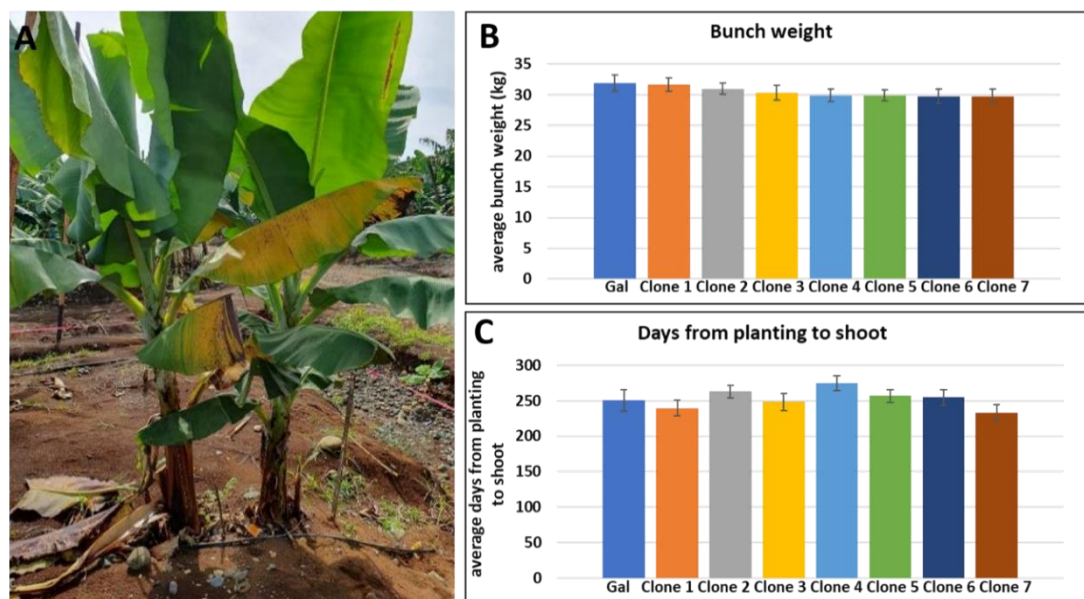
## RESULTS AND DISCUSSION

### TR4 Resistance

Initial screening at Wageningen University identified asymptomatic mutant plants grown in TR4-infested substrate (Figure 1). Selected plants were propagated via tissue culture and evaluated in three successive field trials under high TR4 pressure in the Philippines (2018–2023), followed by validation in Colombia. Across trials, resistant clones consistently showed minimal disease incidence and maintained yield and developmental parameters comparable to the commercial GAL cultivar (Figure 2). Progressive selection increased resistance stability, with the best clones exhibiting less than 1% infection after the first harvest. Colombian trials confirmed resistance robustness across environments, with >90% plant survival under natural TR4 infection.



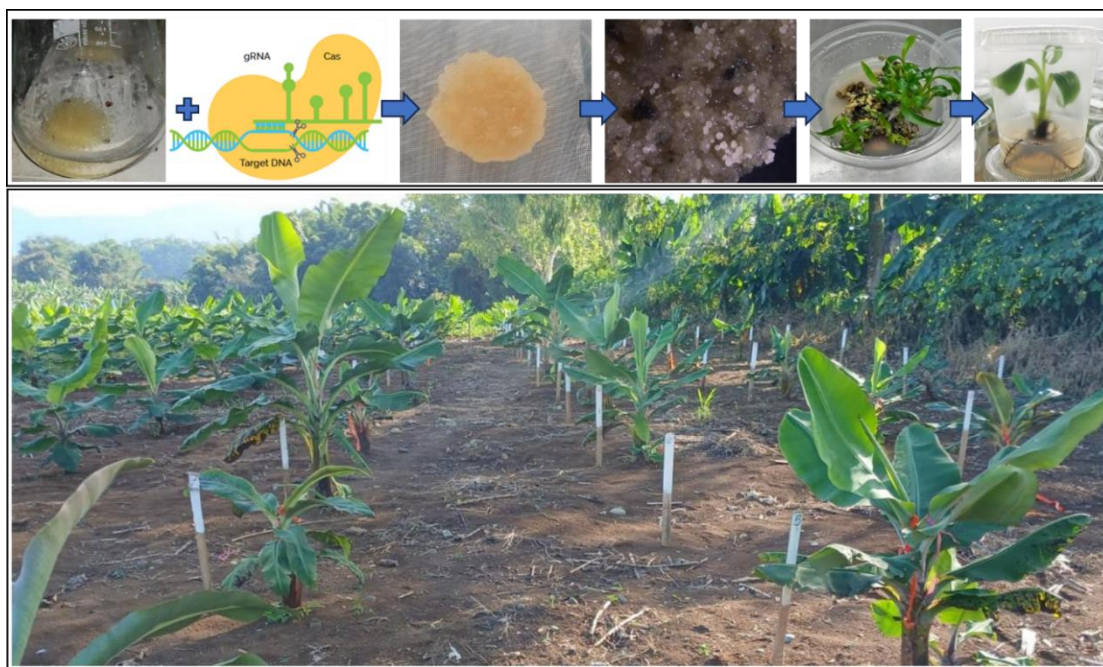
**Figure 1.** Co-cultivation assay for the identification of asymptomatic banana plants under Fusarium (TR4) pressure. (A) Banana plants grown under greenhouse conditions at Wageningen University, with two plants per pot to ensure uniform exposure to TR4-infested substrate during the initial selection phase. (B) Representative symptoms observed in susceptible plants following TR4 infection. (C) Representative examples of pots containing two banana plants grown in TR4-infested substrate, where one plant remains asymptomatic while the companion plant displays typical TR4 symptoms.



**Figure 2.** Performance of TR4-resistant banana clones under severe field infection pressure in the Philippine field trial. (A) Showing paired plantings, where the commercial control plant (left in the image) exhibits clear symptoms of *Fusarium* (TR4), including leaf yellowing and wilting, while an adjacent resistant clone planted at a distance of approximately 20–30 cm (right in the image) remains asymptomatic. (B) Bunch weight of seven selected mutant clones relative to the original GAL cultivar, showing no significant differences among genotypes. (C) Time from planting to shooting (days) for the same clones, demonstrating developmental timing comparable to GAL.

### Genome Editing for BLSD High Tolerance

Eighteen candidate genes associated with BLSD susceptibility were independently edited using CRISPR/Cas. Edited plants were regenerated from all targets, and molecular analysis confirmed targeted mutations in approximately 70% of regenerated plants, each carrying a mutation in a single gene. The successful production of genome edited banana plants from embryogenic cell suspensions highlights the establishment of a robust and reproducible genome-editing pipeline (Figure 3 up), enabling the generation of large, genetically defined plant populations for future phenotypic screening and field evaluation. The first batch of genome-edited plants was planted in the Philippines in late 2025 under high BLSD pressure, following regulatory approval. Field evaluation is ongoing (Figure 3 down).



**Figure 3.** Genome-editing pipeline and field evaluation of banana plants for Black Sigatoka disease tolerance. The upper panel illustrates the genome-editing workflow in banana, starting from embryogenic cell suspensions, CRISPR/Cas-mediated targeted genome modification, and subsequent regeneration through somatic embryogenesis to produce rooted plantlets. The lower panel shows the field trial established in the Philippines, where genome-edited banana plants were planted under natural Black Sigatoka disease pressure for phenotypic evaluation and validation.

### Climate Change Resilience

Banana production in Latin America is increasingly exposed to climatic stressors, including rising temperatures (Figure 4A), more frequent heat extremes, and shifts in water availability. Genome editing was also applied to genes associated with heat, drought, and salinity tolerance using the same cell-suspension-based pipeline. Edited plants are currently being evaluated under controlled stress conditions in collaboration with the Hebrew University of Jerusalem (Figure 4). Preliminary screening aims to identify lines with improved adaptation to elevated temperature, reduced water availability, and saline soils.



**Figure 4.** Climate trends and evaluation of genome-edited banana plants for abiotic stress resilience. (A) Increase in annual average temperature over the last five decades in selected Latin American banana-producing countries (Ecuador, Colombia, and Costa Rica), based on regional climate assessments reported by the World Meteorological Organization and the IPCC Sixth Assessment Report. (B) Field evaluation of genome-edited banana plants under elevated temperature conditions at the Hebrew University experimental plantation, used to assess heat tolerance. (C) Controlled lysimeter-based experiments at the Hebrew University Faculty of Agriculture for the evaluation of genome-edited banana plants with improved water-use efficiency under reduced water availability.

## CONCLUSIONS

This study demonstrates Rahan Meristem's integrated and forward-looking approach to addressing the most critical challenges currently facing global banana production: Fusarium wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 (TR4), Black Sigatoka disease, and the increasing impact of climate change. By combining mutation breeding, genome editing, and extensive multi-location field validation, Rahan Meristem have the ability to develop Cavendish-based banana lines that maintain commercial agronomic performance while exhibiting enhanced resistance or tolerance to major biotic and abiotic stresses. Through a rigorous, multi-year selection process conducted under extreme disease pressure in the Philippines and Colombia, TR4-resistant Cavendish clones were identified with stable resistance and yield performance comparable to the commercial GAL cultivar. In parallel, genome-editing technologies enabled the precise modification of banana genes, resulting in independent edited lines that are now being selected for high tolerance to Black Sigatoka disease. In addition, genome editing was applied to develop banana lines with improved resilience to climate-related stresses. Ongoing evaluations under controlled stress conditions identifying promising candidates with enhanced adaptive capacity, addressing the growing vulnerability of banana production systems under future climate scenarios.

Collectively, these results highlight Rahan Meristem's commitment to deploying the most advanced biotechnological tools to support banana growers worldwide. The long-term objective is the development of next-generation Cavendish-based varieties that combine durable TR4 resistance, high tolerance to Black Sigatoka disease, and improved resilience to climate change. Such varieties will be essential for ensuring the sustainability, productivity, and economic viability of banana cultivation in the coming decades.

## REFERENCES

- Assa G, Kalter N, Rosenberg M, Beck A, Markovich O, Gontmakher T, Hendel A, Yakhini Z. 2024. Quantifying allele-specific CRISPR editing activity with CRISPECTOR2.0, *Nucleic Acids Research*, Volume 52, Issue 16, 9 September 2024, Page e78.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- United States Patent. 2024. Method for producing banana plants with tolerance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4. US12082544B2.
- World Meteorological Organization (WMO). 2023. *State of the Climate in Latin America and the Caribbean*. WMO-No. 1330. Geneva, Switzerland.

## Respuesta de plántulas de banano en vivero a dosis de vermicompost en el sustrato

Salomón A. Barrezueta Unda<sup>1\*</sup>, Abrahan R. Cervantes A<sup>1,2</sup>, Jorge A. Valle Espinoza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador. <sup>2</sup>Colegio de Ingenieros Agrónomos de El Oro. Av Madero Vargas, Machala, Ecuador

\*Autor de correspondencia:  
Salomon A. Barrezueta Unda  
sabarrezueta@utmachala.edu.ec

Contribución:  
Artículo Científico

Sección:  
Manejo de suelos y Nutrición  
química y orgánica

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

Cita:  
Barrezueta Unda SA, Cervantes  
AR, Valle Espinoza JA. 2026.  
Respuesta de plántulas de  
banano en vivero a dosis de  
vermicompost en el sustrato.  
*Acorbat Revista de Tecnología  
y Ciencia* 3(1): 135  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26135>



### RESUMEN

La producción de banano genera grandes volúmenes de restos vegetales poscosecha, especialmente raquis, cuya adecuada gestión es clave para evitar plagas. La multiplicación in vitro permite obtener plantas sanas, y un sustrato adecuado favorece su enraizamiento y desarrollo. Por esto el objetivo de la investigación fue caracterizar vermicompost elaborado con raquis de banano y evaluar su efecto sobre el crecimiento del clon Williams en vivero. Se compostaron raquis y otros residuos durante 120 días, y luego se incorporó *Eisenia foetida* en cajas de madera por 60 días para obtener vermicompost. Se empleó un diseño completamente al azar con 20 plantas por tratamiento en fundas de 3 kg. Los tratamientos fueron: T1 (100 g de vermicompost + 650 g de cascarilla + 650 g de arena), T2 (200 g + 600 g + 600 g), T3 (300 g + 500 g + 500 g) y T4 testigo (0 g + 500 g de cascarilla + 300 g de suelo + 500 g de arena). Se monitorearon pH y conductividad eléctrica del vermicompost; este presentó pH ligeramente alcalino ( $\approx 7,5-7,9$ ) y conductividad  $\leq 2100 \mu\text{S/m}$ . En planta, la altura máxima se registró con T2, mientras que T3 incrementó significativamente el diámetro del pseudotallo. La longitud radical mostró tendencia positiva con T3, aunque sin diferencias estadísticas. Estos resultados confirman que el vermicompost de raquis es una herramienta sostenible para mejorar el desarrollo de plantas de banano en vivero, optimizando crecimiento y calidad del material vegetal.

**Palabras clave:** Compostaje, *Eisenia foetida*; *Musa* spp., Pseudotallo

### ABSTRACT

Banana production generates large volumes of postharvest plant residues, especially rachis, whose proper management is key to preventing pests. In vitro propagation allows the production of healthy plants, and an adequate substrate promotes rooting and development. Therefore, the objective of this study was to characterize vermicompost made from banana rachis and evaluate its effect on the growth of the Williams clone in a nursery. Rachis and other residues were composted for 120 days, and then *Eisenia foetida* was incorporated in wooden boxes for 60 days to obtain vermicompost. A completely randomized design was used with 15 plants per treatment in 3 kg bags. The treatments were: T1 (100 g vermicompost + 650 g rice husk + 650 g sand), T2 (200 g + 600 g + 600 g), T3 (300 g + 500 g + 500 g), and T4 control (0 g + 500 g rice husk + 300 g soil + 500 g sand). The pH and electrical conductivity of the vermicompost were monitored; it showed a slightly alkaline pH ( $\approx 7.5-7.9$ ) and conductivity  $\leq 2100 \mu\text{S/m}$ . In plants, maximum height was observed in T2, while T3 significantly increased pseudostem diameter. Root length showed a positive trend with T3, although no statistical differences were observed. These results confirm that banana rachis vermicompost is a sustainable tool to enhance nursery plant development, optimizing growth and quality of the planting material.

**Keywords:** Composting, *Eisenia foetida*; *Musa* spp., Pseudostem

## INTRODUCCIÓN

El banano (*Musa* AAA Simmonds) es un cultivo clave para las regiones tropicales y subtropicales, fuente esencial de ingresos para millones de personas. La producción mundial de banano se concentra principalmente en Asia (55,9%), seguida de África (24,6%) y América (Akech *et al.*, 2024). En Ecuador ocupa 180.965 ha que representa el 20,57 % del área agrícola (INEC, 2024). Es una planta perenne y de propagación vegetativa, característica que asegura su continuidad y productividad (Akech *et al.*, 2024). Por esta importancia económica y característica reproductiva, las áreas cultivadas con banano se expanden y se renuevan de manera constante, lo que obliga a disponer de material vegetal libre de patógenos y, sobre todo, capaz de mantener o incrementar su rendimiento una vez establecido en campo (Vargas-Sarmiento *et al.*, 2025).

La obtención de material de siembra por regeneración natural no es la opción más adecuada para establecer nuevas plantaciones, pues facilita la transmisión de plagas y patógenos, disminuye la calidad del material y compromete el desempeño posterior del cultivo, con pérdidas significativas de rendimiento que desincentivan al productor (García *et al.*, 2016). La obtención de material de siembra vía micropropagación es la alternativa más viable, debido a la alta calidad fisiológica y sanitaria que ofrece este método de propagación. Pero la calidad fitosanitaria que se compromete en la fase de vivero (Vargas-Sarmiento *et al.*, 2025; Zambrano-Saavedra *et al.*, 2024).

En ese escenario, la fase de vivero es crítica; el sustrato utilizado condiciona el desempeño posterior en etapa de producción (García *et al.*, 2022; Quispe *et al.*, 2021). Esto es especialmente relevante para el grupo Cavendish, que se propaga a partir de meristemos apicales *in vitro* para asegurar uniformidad y sanidad (García *et al.*, 2022); no obstante, su productividad depende de sustratos que faciliten un enraizamiento rápido, buena aireación y nutrición equilibrada desde el vivero (Vargas-Sarmiento *et al.*, 2025).

Por otra parte, un reto paralelo es la gestión de los restos vegetales de la cosecha (hojarasca, pseudotallos, raquis), que en condiciones inadecuadas pueden convertirse en fuentes de inóculo y refugio para patógenos (bacterias y hongos) y plagas del banano (insectos, ácaros y otros artrópodos), comprometiendo la bioseguridad y la sostenibilidad del sistema productivo (García *et al.*, 2022). Transformar estos residuos en insumos benéficos es, por tanto, una prioridad técnica y ambiental. Una de las formas para la gestión de restos vegetales de la cosecha, es mediante vermicompostaje procesos que imita la descomposición natural de residuos orgánicos mediante la acción de microorganismos (Quadar *et al.*, 2022). En este sentido, múltiples estudios reportan

que la incorporación de vermicompost al sustrato estimula la germinación y el crecimiento radicular mejora la estructura física del medio y actúa como acondicionador, incrementando la retención de agua y la aireación (Acosta *et al.*, 2013; Quispe *et al.*, 2021; Yattoo *et al.*, 2021). Además, el uso de vermicompost contribuye al manejo de plagas y patógenos del suelo (p. ej., *Fusarium oxysporum*, *Rastolnia* spp., y nematodos) mediante supresión biológica, inducción de resistencia sistémica (fitoalexinas y enzimas defensivas) y liberación de compuestos con efectos repelentes, reduciendo la dependencia de plaguicidas químicos y fortaleciendo el enfoque de manejo integrado en viveros de *Musa* spp (López *et al.*, 2011; Cruz *et al.*, 2024).

Valorar el vermicompost derivado de residuos vegetales locales (banano, cacao, estiércol y pasto) como estrategia circular para mitigar el riesgo fitosanitario asociado a los restos de cosecha al convertirlos en una enmienda estable y biológicamente activa; optimizar las propiedades fisicoquímicas del sustrato en vivero; y potenciar la calidad morfológica de las plántulas, con efectos esperados en el establecimiento y rendimiento de las plantas en campo. Por esto, la investigación tuvo como objetivos caracterizar el vermicompost obtenido a partir de residuos de banano y analizar el efecto de varias dosis de vermicompost en variables morfológicas de plantas de banana clon Williams en etapa de vivero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización y condiciones ambientales

El estudio se realizó en la granja Experimental Santa Inés de la Universidad Técnica de Machala, ubicada en la parroquia El Cambio de la ciudad de Machala (El Oro, Ecuador). La finca se ubica a 3°19'26" S y 79°54'31" W, a una altitud de 6 m s. n. m. El clima corresponde a bosque húmedo tropical, con temperaturas entre 23 °C y 33 °C, precipitaciones anuales de 464 mm y humedad relativa promedio del 85 %.

### Preparación del compost

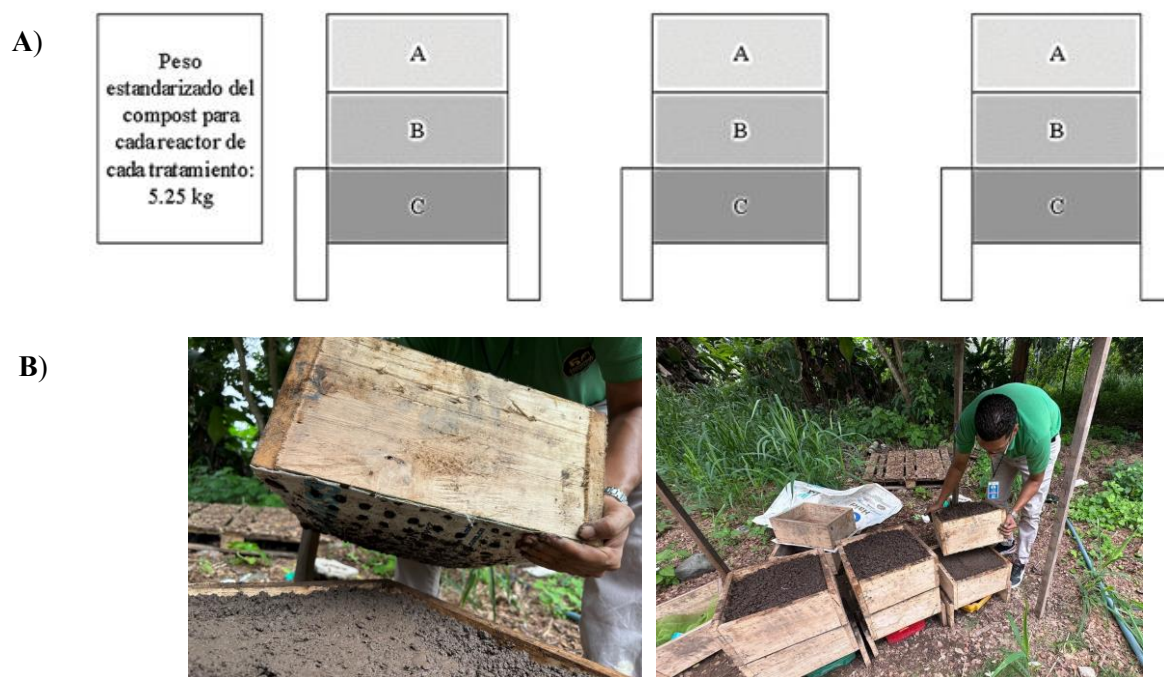
Se utilizó para el compostaje se utilizó raquis de banano de una semana después de cosechado (830,68 kg), carbón vegetal (20,91 kg), pasto janeiro (7,27 kg) de un día de corte, estiércol de vaca (79,09 kg) en estado fresco, hojarasca de cacao (17,27 kg), hojarasca de *Acacia farnesiana* (267,73 kg) y suero de leche (30 L). Estos materiales se mezclaron por capas en una fosa de 2 m × 1,5 m y de 1,1 m de alto. En el fondo de la fosa se colocó el raquis picado y se añadió sucesivamente cada componente por capas. Se instaló un tubo perforado de hierro galvanizado de media pulgada en el centro para favorecer la aireación y se cubrió la mezcla con plástico negro para mantener la humedad. Durante 12 semanas se volteó la mezcla cada 3 días para evitar anaerobiosis.

El material compostado se cosecho cuando la temperatura del lecho se estabilizó en el rango de 25–29 °C medidos a las 010:00, 13:00 y 16:00.

Se recomienda para el compost utilizar raquis de banano provenientes de cada finca para evitar diseminación de Foc R4T, Moko y otros patógenos.

### Diseño y manejo del sistema de vermicompostaje

El compost cosechado en fresco se dispuso en tres cajones de madera de 32 cm de ancho, 38 cm de largo y 20 cm de profundidad, que se apilaron uno en cima del otro (Figura 1A). En el fondo de cada cajo se colocó un fondo plástico perforado (1 pulgada de diámetro) para permitir la migración de las lombrices entre compartimentos y drenar lixiviados (Figura 1B).



**Figura 1.** Sistema de vermicompost: A) Disposiciones generales de los cajones de madera B) Ubicación de cajones.

Con el fin de adaptar la biota anélida al compost, se mezcló 1 kg de suelo previamente desinfectado con agua caliente y secado al ambiente por 48 horas con 1 kg de compost en cada cajón. Cada caja se llenó con el compost, dejando 5 cm libres, y se incorporaron aproximadamente 300 a 350 lombrices de la especie *Eisenia foetida* en cada caja de madera. Para minimizar la variabilidad ambiental (precipitación y radiación solar), la pila de cajones se cubrió con plástico y se ubicaron bajo techo. El

riego se programó cada cuatro días con 2 L de agua por cajón para mantener una humedad adecuada para la supervivencia de las lombrices. Como barrera frente a hormigas (principales depredadores de las lombrices) se aplicaron 200 mL de vinagre diluidos en 1 L de agua alrededor de los cajones cada 3 días.

A los 10 días se realizó el cambio de posición de los cajones: el primer cajón se ubicó en el lugar del tercero, el segundo pasó al primer lugar y el tercero al segundo. Este proceso se realizó por 5 ocasiones, completando 60 días. El esquema de rotación permitió optimizar el proceso y facilitar la recolección sucesiva del vermicompost.

### **Cosecha del vermicompost**

Diez días antes de la cosecha se suspendió el riego y, 24 horas previas al tamizado del vermicompost, se retiró la cobertura de los cajones para favorecer la aireación. El material cosechado se tamizó con malla de 5 mm × 5 mm y, posteriormente, se remitió al laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Agropecuarias para su análisis. Los huevos y las lombrices fueron retiradas del tamiz para incorporar al primer cajón.

### **Caracterización del vermicompost**

Se caracterizó al vermicompost por su conformación física y química de la siguiente manera. Porcentaje de Fibra, parámetro que se obtuvo mediante el método de Weender modificado. Las muestras de vermicompost fueron sometidas a extracción con disolventes orgánicos en bolsas de Weender en mufla a 550 °C por 2 horas. Luego se coloca en un desecador por 30 minutos y se pesaron. Se calcula el contenido de Fibra Cruda por diferencia de peso entre la muestra en húmedo menos la muestra calcinada, resultado que se divide para el peso de la muestra sometida a la digestión, este valor obtenido se multiplica por 100.

El porcentaje de Ceniza se determinó mediante el método termogravimétrico, que consiste en someter a las muestras de vermicompost a calcinación entre 650 - 700 °C, durante 4 horas, hasta obtener un residuo de color blanco o grisáceo. Se extrae el crisol con las cenizas de la mufla, se enfría en un desecador y se pesa para su cálculo por diferencia de peso y se multiplica por 100.

La conductividad eléctrica (CE) y el pH del compost y vermicompost se determinaron cada diez días en muestras de 10 g mezcladas con 20 mL de agua destilada (relación 1:2) utilizando un medidor potenciometro (Hanna modelo Hi 9880, Rumania). En total se tomaron seis muestras de compost y de vermicompost.

De cada muestra se obtuvieron tres submuestras, en las cuales se determinó, en el vermicompost, el contenido de carbono por diferencia de peso, mediante el siguiente procedimiento: se pesaron 2–5 g de muestra (vermicompost) en crisol tarado, se

calcinaron a 550–600 °C durante 4 horas, se enfriaron en desecador y se pesaron para calcular el porcentaje de ceniza totales

También se determinó el nitrógeno total mediante el método Kjeldahl, conforme a procedimientos analíticos estandarizados.

### **Diseño del ensayo**

Las plantas de banano clon William se colocaron en fundas de 20 × 20 cm. Las fundas se dispusieron de forma homogénea en el área experimental, bajo cubierta con malla negra para generar sombra y así mitigar el estrés térmico por efectos de los rayos solares. Cada funda recibió 1 L de agua por semana y no se aplicaron fertilizantes químicos durante el ensayo.

Se evaluaron cuatro tratamientos de sustrato: T1 con 100 g de vermicompost, 650 g de cascarilla de arroz y 650 g de arena; T2 con 200 g de vermicompost, 600 g de cascarilla de arroz y 600 g de arena; T3 con 300 g de vermicompost, 500 g de cascarilla de arroz y 500 g de arena; y T4 (testigo) sin vermicompost, con 500 g de cascarilla de arroz y una mezcla de 300 g de suelo + 500 g de arena. El total de plantas por tratamientos fue de 20 plantas en un diseño completamente al azar.

### **Variables evaluadas y procedimientos de medición en vivero**

En vivero, la altura de la planta se midió desde la base hasta el meristemo apical con cinta métrica. El fuste de la planta se midió en la mitad de la altura del pseudotallo de la planta con una cinta métrica. La emisión foliar se registró como el número de hojas emitidas por planta cada semana. Para la longitud de la raíz se extrajo la planta de la funda y se midió desde la base del cormo hasta la raíz más larga.

Para el peso se cortó el pseudotallo y se separaron el cormo y las raíces; luego se pesaron raíz + cormo, raíz y cormo individual en una balanza digital.

El contenido de clorofila foliar se estimó con un medidor SPAD (Konica Minolta, Japon). Las lecturas se realizaron en la tercera hoja completamente expandida, contada desde el ápice, evitando el nervio central. En cada planta se delimitó un cuadrante de 5 × 5 cm en el tercio medio de la lámina; dentro de ese cuadrante se tomaron seis lecturas puntuales desde la zona central hacia el borde, separadas al menos 1 cm entre sí. Los valores se promediaron para obtener un único registro por planta (unidades SPAD). Las mediciones se efectuaron con la hoja limpia y sin gotas de agua, entre 09:00–11:00 h de la mañana. Los datos fueron tomados a las 10 semanas de transferir de las bandejas de germinación hasta las fundas.

### **Análisis estadístico**

Previo a los análisis inferenciales se efectuó una exploración de datos y se verificó la homogeneidad de varianzas. En el caso de los valores de CE y pH, dado el seguimiento temporal, se compararon tratamientos por fecha (ANOVA de una vía en cada tiempo) y se describieron las tendencias a lo largo del periodo de evaluación. Para las variables morfológicas y SPAD se ajustó un ANOVA de una vía con el factor “tratamiento” y la comparación de medias se realizó mediante la prueba de Duncan ( $\alpha = 0,05$ ). Todos los análisis se efectuaron en el software InfoStat.

## RESULTADOS

### Caracterización físico-química de compost y vermicompost

Las características físicas del compost y vermicompost se presentan en la tabla 1. El vermicompost mostró 20,29 % de fibra y 25,7 % de ceniza, frente a 13,5 % y 11,5 % del compost, respectivamente. Esto evidencia una mayor mineralización durante la formación de vermicompost y elevó el porcentaje de la fibra por pérdida de compuestos lábiles como azúcares, almidones, lípidos, fenoles y otros. Estos compuestos son metabolizados rápidamente por el microbiota y las lombrices, liberando CO<sub>2</sub> y transformándose en fracciones más estables como huminas y ácidos húmicos. Por eso aumenta la proporción relativa de fibra (celulosa y lignina más resistentes) y de cenizas minerales (González, Pérez & López 2021).

El vermicompost presentó aproximadamente 20 % de carbono orgánico y 1,8 % de nitrógeno total. Estos valores reflejan un material orgánico estabilizado, con adecuada humificación y una relación C/N cercana a 10:1, favorable para la mineralización gradual de nutrientes en el suelo. Los valores de carbono y nitrógeno se explican por la degradación microbiana de compuestos lábiles y la pérdida de carbono como CO<sub>2</sub> durante el compostaje, lo que concentra el nitrógeno, favorece la humificación y estabiliza la relación C/N del vermicompost.

**Tabla 1.** Características físicas de compost y vermicompost.

Parámetro	Compost	Vermicompost
Fibra (%)	13,5	20,29
Ceniza (%)	11,5	25,7
Carbono (%)	--	20
Nitrógeno (%)		1,8

## Conductividad eléctrica y pH de los sustratos

La conductividad eléctrica del compost mostró valores relativamente bajos y muy fluctuantes durante los 60 días de medición (Tabla 2). La menor media correspondió a la segunda muestra con 1 099  $\mu\text{S/m}$  y la mayor media a la cuarta muestra con 1 890  $\mu\text{S/m}$ , sin exceder los niveles óptimos ( $< 2\,000\ \mu\text{S/m}$ ) para suelos agrícolas (USDA-NRCS, 2011). En el caso del vermicompost, los valores iniciales fueron altos (2 454  $\mu\text{S/m}$ ) posiblemente a la presencia de sales solubles liberadas durante la digestión de las lombrices; sin embargo, a partir del día 40 la CE disminuyó hasta 2 076  $\mu\text{S/m}$ , indicando un lavado gradual de sales por el riego periodo de los cajones (Shaheen *et al.*, 2024).

El pH del compost se mantuvo ligeramente alcalino, oscilando entre 7,9 y 8,7, mientras que el vermicompost presentó valores entre 7,5 y 7,95 (Figura 2). Los valores obtenidos de pH fueron mayores a los registros de Parmar *et al.*, (2019) y Shaheen *et al.*, (2024), que obtuvieron vermicompost con pH entre 7,1 a 7,3 y que lo atribuye a la secreción de iones  $\text{NH}_4^+$ , que reducen la concentración de iones  $\text{H}^+$  y a la actividad de las glándulas calcíferas en las lombrices de tierra, las cuales contienen anhidrasa carbónica que cataliza la fijación de  $\text{CO}_2$  como  $\text{CaCO}_3$  (Carbonato de calcio).

**Tabla 2.** Conductividad eléctrica y pH de los sustratos: compost y Vermicompost.

Sustratos	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
<b>C. E (<math>\mu\text{S/m}</math>)</b>						
Compost	1481,8	1099,0	1736,6	1460,4	1295,4	1890,0
Vermicompost	2454	2434	2500	2100	2336	2076
<b>pH</b>						
Compost	8,7	7,9	8,1	7,9	7,8	8,0
Vermicompost	7,8	7,6	7,5	7,6	7,6	8,0

## Variables morfológicas de las plántulas

Las variables morfológicas evaluadas mostraron diferencias entre tratamientos (Tabla 3). La mayor longitud (altura) de las plántulas se registró en T2 ( $51,5 \pm 12,8$  cm), seguido de T3 ( $50,0 \pm 12,9$  cm) y T1 ( $45,5 \pm 11,2$  cm), mientras que el control (T4) presentó la menor altura ( $41,8 \pm 11,2$  cm). Las diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre el testigo y los demás tratamientos también se reportan en los trabajos de Quispe *et al.*, (2021) y Vargas-Sarmiento *et al.* (2025), en Gran nain y Gross Michel, respetivamente, que utilizaron vermicompost en sus ensayos.

Esto concuerda con lo señalado por Vargas-Sarmiento *et al.* (2025), quienes reportaron que un mayor aporte de vermicompost en la mezcla del sustrato favorece la

elongación del tallo en *Musa spp.*, al optimizar la disponibilidad de nutrientes, en especial nitrógeno y fósforo.

Quispe *et al.*, (2021) indicaron que el lixiviado del vermicompost de lombrices contiene minerales (fósforo, potasio, calcio, magnesio y sodio) en cantidades variables; así como, pequeñas cantidades de nitrógeno. Elementos que intervienen en de manera directa en el crecimiento de las plantas.

El mayor diámetro de pseudotallo se obtuvo en el T3 ( $10,3 \pm 0,7$  cm, a), seguido por el T4 ( $9,5 \pm 0,6$  cm, b), mientras que los valores más bajos correspondieron a T2 ( $9,1 \pm 0,6$  cm, c) y T1 ( $9,0 \pm 0,5$  cm, c). Estos hallazgos son consistentes con los resultados de Maqbool *et al.* (2020) y Quispe *et al.*, (2021), quienes reportaron que dosis altas de vermicompost aumentaron significativamente el grosor del pseudotallo en banano Cavendish, mejorando el vigor y la capacidad de sostén de las plantas en vivero. También Quispe *et al.*, (2021) indicaron que los ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (HF) en vermicompost presentan una concentración entre 0.610.66 mg/L de lixiviado, estos ácidos regulan muchos procesos del desarrollo vegetal, además de mejorar la adsorción de macro y micronutrientes (Aremu *et al.*, 2012).

La mayor emisión foliar se observó en el T3 ( $8,8 \pm 0,41$ , a), junto con el T4 ( $8,6 \pm 0,45$ , a), mientras que el T1 ( $8,4 \pm 0,4$ , b) mostró un valor intermedio y el T2 ( $8,1 \pm 0,59$ , c) el más bajo. Estas diferencias significativas indican que el aporte de 300 g de vermicompost estimuló la producción de hojas nuevas, aumentando la superficie fotosintética activa, aunque el testigo mantuvo un desempeño comparable en esta variable. Resultados similares fueron obtenidos por Aremu *et al.*, (2012), Ali *et al.* (2023), Mago *et al.* (2021) y Yunida *et al.* (2023) quienes destacaron que el vermicompost no incide en la emisión foliar, pero si promueve la expansión foliar por la actividad microbiana del sustrato.

Por otra parte, los valores de clorofila fueron más elevados en el T3 ( $36,0 \pm 2,2$ ), seguido por T2 ( $33,2 \pm 2,0$ ) y el T1 ( $30,4 \pm 6,2$ ), mientras que el menor valor correspondió a T4 ( $29,6 \pm 5$ ). Valores inferiores a los descritos por Vargas-Sarmiento *et al.*, (2025). Las diferencias significativas solo entre el valor más alto (T3) y el resto de tratamiento muestran que la aplicación de vermicompost no incrementó de manera directa el contenido de clorofila. Este comportamiento podría deberse a la liberación progresiva de nutrientes en el vermicompost, lo cual prioriza inicialmente el crecimiento estructural sobre la síntesis de pigmentos fotosintéticos (Singh *et al.*, 2019). De igual manera, Sarmah *et al.* (2022) señalaron que la incorporación de materia orgánica en sustratos de *Musa spp.* aumentó la biomasa radical y la producción de

hojas, pero no siempre elevó la concentración de clorofila en las fases tempranas de crecimiento.

**Tabla 3.** Variables morfológicas de plántulas de banano según tratamiento.

Variables	T1	T2	T3	T4
Altura de planta (cm)	45,5 ±11,2 a	51,5 ±12,8 a	50,0 ±12,9 a	41,8 ±11,2 b
Fuste o diámetro (cm)	9,0 ±0,5 c	9,1 ±0,6 c	10,3 ±0,7 a	9,5 ±0,6 b
Emisión foliar (n.º hojas)	8,4 ± 0,4 b	8,1 ± 0,59 c	8,8 ± 0,41 a	8,6 ± 0,45 a
Clorofila (spad)	30,4 ±6,5 ab	33,2 ± 2,0 ab	36,0 ±2,2 a	29,6 ± 5 ab

Nota: Las letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ )

### Peso y longitud del sistema radical

Las variables de biomasa radicular y longitud se analizaron mediante ANOVA (Tabla 4). Aunque no se detectaron diferencias significativas, se observó una tendencia a mayores valores en los tratamientos con vermicompost. El peso combinado de raíz y cormo osciló entre  $0,43 \pm 0,06$  kg en T2 y  $0,54 \pm 0,04$  kg en T3, sin registrarse diferencias significativas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ). Mientras que, el peso radical varió entre  $0,34 \pm 0,06$  kg en T2 y  $0,43 \pm 0,03$  kg en T3, sin diferencias significativas ( $p > 0,05$ ).

Por otra parte, el peso de las raíces en seco registró  $0,32 \pm 0,03$  kg en T1, mientras que T3 y T4 alcanzaron  $0,31 \pm 0,08$  kg y  $0,30 \pm 0,07$  kg, respectivamente, conformando el subgrupo estadístico *a*. En contraste, T2 mostró el menor valor ( $0,27 \pm 0,04$  kg; subgrupo *b*), lo que evidencia una mayor pérdida de peso durante el secado. Maqbool et al. (2020) reportaron resultados similares en banano Cavendish, donde el vermicompost no generó diferencias significativas en peso radical en fresco, aunque mostró una tendencia a valores superiores con mayor enmienda orgánica.

La reducción de biomasa radical en T2 se asocia a una mayor proporción de vermicompost (200 g), que incrementó la retención de humedad y favoreció tejidos radicales más suculentos, los cuales experimentan mayor pérdida de agua al desecarse. En T1, la menor dosis de vermicompost (100 g), combinada con altas proporciones de cascarilla de arroz y arena, promovió raíces con mayor contenido estructural, reduciendo la pérdida de peso seco. T3, pese a su mayor aporte de vermicompost (300 g), mantuvo valores similares a T1, posiblemente por un balance adecuado entre materia orgánica y fracción mineral. El testigo (T4) presentó un comportamiento

intermedio, atribuible a la ausencia de vermicompost y a la influencia del suelo mineral en la formación de raíces más densas.

En el peso del cormo, los valores oscilaron entre  $0,10 \pm 0,01$  kg en T2 y T4 y  $0,11 \pm 0,01-0,03$  kg en T1 y T3, sin diferencias significativas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ). La estabilidad del peso de cormo sugiere que este componente estructural presenta menor sensibilidad a las variaciones en la dosis de vermicompost en etapas tempranas de desarrollo. Según Hernández *et al.* (2021), el cormo suele mostrar cambios más notorios en fases avanzadas de crecimiento, cuando la planta ha acumulado suficiente biomasa aérea y radical.

Por otra parte, la longitud radical osciló entre  $44 \pm 7$  cm en T2 y  $52 \pm 1$  cm en T3, sin diferencias significativas ( $p > 0,05$ ). A diferencia de Aremu *et al.* (2012), quienes reportaron un incremento significativo en el crecimiento radical debido a una mayor absorción de nitrógeno, y de Acosta *et al.* (2013), que atribuyen dicho efecto al vermicompost por mejorar la estructura, oxigenación y microbiota del sustrato, en este estudio el tiempo de permanencia en fundas podría haber limitado este desarrollo.

**Tabla 4.** Peso y longitud radical media por tratamiento.

Variable	T1	T2	T3	T4
Peso raíz + cormo (kg) en fresco	$0,51 \pm 0,11$ a	$0,43 \pm 0,06$ a	$0,54 \pm 0,04$ a	$0,46 \pm 0,07$ a
Peso de raíz (kg) en fresco	$0,40 \pm 0,08$ a	$0,34 \pm 0,06$ a	$0,43 \pm 0,03$ a	$0,36 \pm 0,06$ a
Peso de raíz (kg) en seco	$0,32 \pm 0,03$ a	$0,27 \pm 0,04$ b	$0,31 \pm 0,08$ a	$0,30 \pm 0,07$ a
Peso del cormo (kg)	$0,11 \pm 0,03$ a	$0,10 \pm 0,01$ a	$0,11 \pm 0,01$ a	$0,10 \pm 0,01$ a
Longitud de la raíz (cm)	$47 \pm 4$ a	$44 \pm 7$ a	$52 \pm 1$ a	$50 \pm 8$ a

## CONCLUSIONES

La caracterización del vermicompost elaborado a partir de residuos de banano y otros restos vegetales evidenció propiedades fisicoquímicas adecuadas para su uso como sustrato de vivero, con niveles de C.E y pH dentro de rangos aceptables para el crecimiento vegetal. En relación con el efecto de las dosis evaluadas sobre las variables morfológicas de plántulas de banano clon Williams, se determinó que la incorporación de vermicompost favoreció significativamente el crecimiento aéreo, destacando la dosis de 300 g (T3), que incrementó el diámetro del pseudotallo. En el sistema radical

no se registraron diferencias significativas; sin embargo, se observó una tendencia a mayor peso y longitud de radical en las plantas tratadas con 300 g de vermicompost, lo que sugiere un efecto positivo en la absorción de nutrientes.

## REFERENCIAS

- Acosta C, Solís O, Villegas O y Cardoso L. 2013. Precomposteo de residuos orgánicos y su efecto en la dinámica poblacional de *Eisenia foetida*. *Agronomía Costarricense*, 37(1), 127–139.
- Akech V, Bengtsson T, Ortiz R, Swennen R, Uwimana B, Ferreira CF, *et al.* 2024. Genetic diversity and population structure in banana (*Musa* spp.) breeding germplasm. *The Plant Genome*, 17(3), e20497.
- Ali S, Khan R, Ahmed N. 2023. Role of organic amendments in enhancing nutrient uptake and growth of banana seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 46(7), 1205–1218. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2170012>
- Aremu AO, Kulkarni MG, Bairu MW, Finnie JF, Van Staden J. 2012. Growth stimulation effects of smoke-water and vermicompost leachate on greenhouse grown-tissue-cultured ‘Williams’ bananas. *Plant Growth Regulation*, 66(2), 111-118.
- Cruz GSJ, Hermes PH, Miriam SV and López AM. 2024. Benefits of vermicompost in agriculture and factors affecting its nutrient content. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(3), 4898–4917.
- García GAC, Cedeño SDRV, Cedeño BAA, Chávez JEC and Álava GAL. 2021. Bioestimulante en el crecimiento y calidad de plántulas de plátano en fase de vivero. *Revista Espamciencia*, 12(2), 124–130.
- García GAC, Macías LV, Cedeño SDR, Álava GL, Chávez JC, García GC. 2022. Macropropagación y calidad de plántulas de plátano (*Musa* AAB Simmonds) en función de sustratos y tamaño de brotes. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 9(2), 108–118.
- García GC, Villacorta HS, Lerner SH, García GC y Herrera IS. 2016. Aplicación de biorreguladores para la macro-propagación del banano cv. Williams en cámara térmica. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2), 397–408.
- Hernández J, Ramírez F and Morales C. 2021. Vermicompost application improves growth and physiological traits of *Musa* spp. *Scientia Horticulturae*, 288, 110353. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110353>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). 2024. Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC), Presentación de resultados 2024. Quito, Ecuador.
- Mago M, Yadav A, Gupta R and Garg V. 2021. Management of banana crop waste biomass using vermicomposting technology. *Bioresource Technology*, 326, 124742.
- Maqbool R, Ahmad M, Rafiq M. 2020. Influence of vermicompost on growth and development of tissue culture banana. *International Journal of Agriculture and Biology*, 24(3), 451–458. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1421>
- Parmar H, Vinod V, Patel S. 2019. Vermicomposting of banana pseudostem and maize fodder (waste) using *Eudrilus eugeniae*. *British Journal of Applied Science & Technology*, 36(1), 1–9.
- Quiñónez E, Rincón G y Lopez L. 2019. Hongos micorrízicos arbusculares y vermicomposta en el crecimiento de papaya. *Revista Agroproductividad*, 12(3), 47–52.

- Quispe CT y Tarqui CEC. 2021. Efecto del lixiviado del lombricompost en hijuelos de banano (*Musa* spp.) en condiciones de vivero. *Apthapi*, 7(2), 2152–2157.
- Sarmah B, Choudhury S and Saikia M. 2022. Organic amendments influence chlorophyll content and biomass production in *Musa* spp. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 72(1), 50–59. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.2004528>
- Shaheen SI, El Hewity MA, MÓhamed AEG and Ahmed MFA. 2024. Efficiency of Some Eco-friendly Treatments for Controlling Root-knot Nematodes on Banana Plants. *The Future of Applied Science*. <https://doi.org/10.37229/fsa.fjas.2023.01.10>
- Singh A, Sharma P and Kumar V. 2019. Nutrient release dynamics from vermicompost and its effect on early plant growth. *Applied Soil Ecology*, 141, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.003>
- USDA Natural Resources Conservation Service. 2011. Soil electrical conductivity (Soil quality indicators sheet).
- Yatoo A, Ali N, Baba AZ and Hassan B. 2021. Sustainable management of diseases and pests in crops by vermicompost and vermicompost tea: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(7), 1–26.
- Yunida E, Yusnita Y, Hapsoro D, Edy A, Munawaroh S and Sari FU. 2023. *In vitro* rooting and acclimatization of plantlets of banana (*Musa paradisiaca* Linn) ‘Ambon Kuning’. *AIP Conference Proceedings*, 2621, 030021. <https://doi.org/10.1063/5.0142295>
- Zambrano Saavedra PS, Arteaga Alcívar FX, Cedeño García GA y Cedeño-García GA. 2024. Bioestimulantes en plátano: Crecimiento y calidad de plántulas en aclimatación. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 8(24), 1012–1030.

## Development of a fertilization recommendation for banana in the State of São Paulo, Brazil: steps toward sustainability

Luiz Antonio Junqueira Teixeira\*<sup>1</sup>, Edson Shigueaki Nomura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Instituto Agrônomo (IAC), Brazil. <sup>2</sup>Researcher, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), Brazil

**\*Autor de correspondencia:**

Luiz Antonio Junqueira  
Teixeira  
lulaiac@gmail.com

**Contribución:**

Artículo Científico

**Sección:**

Manejo de suelos y Nutrición  
química y orgánica

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Junqueira Teixeira LA,  
Shigueaki Nomura E. 2026.  
Development of a fertilization  
recommendation for banana in  
the State of São Paulo, Brazil:  
steps toward sustainability.  
*Acorbat Revista de Tecnología  
y Ciencia* 3(1): 136  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26136>

### ABSTRACT

Brazil is a leading global banana producer, but the sector faces mounting economic pressures and climate variability, necessitating more efficient and sustainable fertilization practices. In response, a dynamic recommendation system for fertilization and liming has been developed for the state of São Paulo, continuously refined through field experimentation. This system employs an integrated soil-plant diagnostic approach, underpinned by principles of soil nutrient dynamics and crop nutritional requirements. Diagnostic reliability is achieved through analytical protocols adapted for tropical soils, such as phosphorus extraction using ion-exchange resin and lime requirement determination based on target base saturation. These soil analyses are complemented by plant tissue standards specific to banana cultivars, providing a holistic view of nutritional status. The calibration and validation of recommendations are centered on field trials. These trials evaluate variables including fertilizer sources, application rates, timing, and fertilizer placement methods. Key performance indicators, such as soil fertility indices, yield, and fruit quality, are used to assess outcomes. The empirical results are synthesized into evidence-based guidelines and decision-support tools designed to optimize nutrient use efficiency and mitigate environmental impacts. By emphasizing adaptability and sustainability, this framework promotes the alignment of fertilization practices with local edaphic and climatic conditions. While developed for São Paulo, the underlying methodologies possess significant transferability to other banana-growing regions, contingent upon local validation. This scientifically-validated yet practical system serves to enhance the resilience and long-term viability of banana production systems facing evolving agronomic and environmental challenges.

**Keywords:** Plant nutrition, Fertilization, Liming, Sustainability

### RESUMEN

Brasil es uno de los principales productores mundiales de bananos, pero el sector se enfrenta a crecientes presiones económicas y a la variabilidad climática, lo que hace necesarias prácticas de fertilización más eficientes y sostenibles. Para responder a este desafío, se desarrolló un sistema dinámico de recomendaciones de fertilización y encalado para el estado de São Paulo, continuamente perfeccionado mediante experimentación en campo. La metodología se basa en un diagnóstico integral suelo-planta, fundamentado en la dinámica de nutrientes del suelo y los requerimientos nutricionales del cultivo. La solidez diagnóstica se asegura con protocolos analíticos adaptados a suelos tropicales, como la extracción de fósforo por resina de intercambio iónico y la determinación de encalado en función de la saturación de bases deseada. Estos análisis se complementan con estándares foliares específicos de



cultivares locales, permitiendo una evaluación completa del estado nutritivo. La calibración y validación de las recomendaciones se apoya en una red de ensayos regionales, donde se analizan fuentes de fertilizantes, dosis, épocas y métodos de aplicación. Los resultados se expresan en indicadores como evolución de la fertilidad del suelo, rendimiento comercial y calidad del fruto. La síntesis empírica genera guías técnicas y herramientas de apoyo a la decisión, orientadas a maximizar la eficiencia del uso de nutrientes y reducir impactos ambientales. Desarrollado para São Paulo, el sistema posee base metodológica sólida y alto potencial de transferencia a otras regiones bananeras, aunque requiere validación local para su implementación.

**Palabras clave:** Nutrición Vegetal, Fertilización, Encalado, Sostenibilidad

## INTRODUCTION

Brazil ranks among the world's leading banana producers, with annual production of approximately seven million tons (Brazilian Institute of Geography and Statistics 2025). However, growers face increasing challenges from economic competition and climate variability, which demand improved fertilization strategies to sustain productivity and quality. In São Paulo, Brazil, research efforts have prioritized the development of integrated nutrient management practices aimed at enhancing yields, fruit quality, economic efficiency, and environmental sustainability.

Until the early 20th century, agriculture depended on the natural fertility of soils. In modern systems, however, sustainable banana production requires external nutrient inputs through mineral or organic fertilization (Nyombi 2019). Several conceptual frameworks guide the formulation of fertilizer and liming recommendations (Hochmuth and Hanlon 2022). Among these are the *Build-Up and Maintenance* approach, which elevates soil nutrient levels to an optimum range and sustains them through regular applications; the *Basic Cation Saturation Ratio* (BCSR), which assumes crop performance is optimized when soil cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{K}^{+}$ ) occur in specific proportions; and the *Sufficiency Range* approach, which supplies nutrients only at levels required to meet crop demand. Critical evaluations of these principles are provided by McLean *et al.* (1983), Kopittke and Menzies (2007), and Hochmuth and Hanlon (2022).

In São Paulo, banana fertilization and liming recommendations were developed by the Instituto Agronômico de Campinas (IAC) and published in Technical Bulletin #100 (Teixeira *et al.* 2022). The system employs the *Sufficiency Range* approach, founded on a precise understanding of soil nutrient dynamics and banana plant nutritional needs, while incorporating sustainability principles such as replenishment

of exported nutrients and minimization of fertilization's environmental impact. These recommendations are continually refined through field experiments (Figure 1).



**Figure 1.** Field experiments on banana fertilization. (A) Ribeira Valley and (B) Planalto Paulista (São Paulo Plateau), Brazil.

To achieve these objectives, analytical methods tailored to tropical soils were developed and calibrated for banana cultivation. These include phosphorus extraction using ion-exchange resin and lime requirement estimation based on base saturation targets (Raij *et al.* 2001). Field trials, which generated calibration curves and evaluated crop productivity in response to different soil P assessment methods, confirmed the superiority of the resin extraction method for estimating plant-available P in tropical soils (Raij *et al.* 2022). In a comprehensive review, Quaggio (2000) compared methods for calculating lime requirements in tropical soils of Brazil. It was concluded that the base saturation method provided recommendations that resulted in the greatest yields for both annual and perennial fruit crops. Plant tissue analysis complements soil testing, with specific nutrient sufficiency ranges established for regional cultivars (Teixeira *et al.* 2007, 2023; Cantarella *et al.* 2022).

This work presents the principles underlying São Paulo's fertilizer and liming recommendations for banana and highlights its potential adaptability for tailoring recommendations to other banana-producing regions.

## MATERIALS AND METHODS

Soil acidity adjustment and the supply of calcium (Ca) and magnesium (Mg) for banana cultivation are achieved by targeting an optimal base saturation of 70% of the soil's cation exchange capacity (CEC) and increasing exchangeable Mg to a minimum of 8 mmolc/dm<sup>3</sup> (Cantarella *et al.* 2022).

Fertilizer recommendations for banana are structured for key developmental stages, establishment, and production. Rates are calculated using an integrated approach that considers soil nutrient availability, expected yield, and plant nutritional status. This method ensures nutrient demand is met, optimizes economic return, and minimizes environmental impact.

Applications of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) are split throughout the year, synchronized with the plant's growth rhythm. As noted by Weinert and Simpson (2016), application rates are modulated phenologically, with increased inputs during warmer months to support peak growth and reduced rates during cooler periods.

Recommendations for the application of sulfur (S) and the micronutrients boron (B) and zinc (Zn) are based on soil availability and foliar concentration levels in plants.

## RESULTS AND DISCUSSION

The fertilizer and liming recommendations for banana cultivation in the state of São Paulo were published by Teixeira *et al.* (2022) as a chapter in the Bulletin #100/IAC (Cantarella *et al.* 2022).

**Liming requirement.** The liming requirement to adjust soil acidity and supply the Ca and Mg needs for banana plants is estimated using the equation:

$$LR = \frac{CEC \times (BS_{BAN} - BS_1)}{10 \times RNP},$$

where  $LR$  = liming requirement (t ha<sup>-1</sup>);  $CEC$  = soil cation exchange capacity (mmolc dm<sup>-3</sup>);  $BS_{BAN}$  = Optimal base saturation for banana (70 %);  $BS_1$  = Current base saturation of the soil (%), and  $RNP$  = Relative neutralizing power of the corrective material (%).

**First-year or establishment fertilization.** Fertilizer rates, as presented in Table 1, should be applied based on soil analysis results, nitrogen response class, and expected productivity. P application should be omitted in soils with resin-extractable P exceeding 80 mg dm<sup>-3</sup>. For soils with exchangeable K greater than 6.0 mmolc dm<sup>-3</sup>, the

recommended K fertilization rate should be reduced by half. N and K fertilizers must be split into six applications. These are to be distributed at 1, 3, 5, 7, 9, and 11 months after planting, corresponding to 10, 15, 15, 20, 20, and 20 percent of the total recommended dose, respectively.

**Table 1.** Fertilization during the first year of the banana plantation (establishment) based on N response classes, soil nutrient content, and expected yield.

Expected Yield	N response classes <sup>(1)</sup>		P resin, mg dm <sup>-3</sup>			K exchangeable, mmolc dm <sup>-3</sup>		
	Low	High	< 16	16 - 40	> 40	< 1.6	1.6 - 3.0	> 3.0
t ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> of N		kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O		
<20	90	110	160	70	40	400	150	100
20 to 30	150	190	180	90	60	600	350	150
31 to 40	210	260	200	110	80	800	550	350
41 to 50	270	340	220	130	100	*	750	550
> 50	330	410	240	150	120	*	950	750

\* It is unlikely to achieve these productivities in the first harvest on soils with very low levels of exchangeable K (< 1.6 mmolc dm<sup>-3</sup>). <sup>(1)</sup>Nitrogen fertilization response classes: **low** = Planting in fallow areas or following legume crops, high soil organic matter content; **high** = Planting in areas with many years of grass or other non-legume cultivation, sandy soils, low organic matter content.

**Production fertilization.** Annual fertilizer applications should be determined based on foliar N concentration, soil analysis results, and expected yield, according to the rates specified in Table 2. P application should be omitted in soils with resin-extractable P exceeding 80 mg dm<sup>-3</sup>. For soils with exchangeable K greater than 6.0 mmolc dm<sup>-3</sup>, the recommended K fertilizer rate should be reduced by half.

**Table 2.** Production annual fertilization for banana plants based on foliar N levels, soil nutrient content, and expected yield.

Expected Yield	N in leaves, g kg <sup>-1</sup>			P resin, mg dm <sup>-3</sup>			K exchangeable, mmolc dm <sup>-3</sup>		
	< 25	25 - 30	> 30	< 16	16 - 40	> 40	< 1.6	1.6 - 3.0	> 3.0
t ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup> of N			kg ha <sup>-1</sup> of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			kg ha <sup>-1</sup> of K <sub>2</sub> O		
<20	130	100	80	140	50	20	420	220	120
20 to 30	200	160	120	150	60	30	450	250	150
31 to 40	300	230	170	160	70	40	510	310	210
41 to 50	380	300	230	170	80	50	570	370	270
51 to 60	460	370	280	180	90	60	630	430	330
> 60	560	450	340	190	100	70	690	490	390

**Fertilizer application schedule.** For rainfed banana cultivation in the State of São Paulo, where winters are colder and drier than summers, fertilizer applications containing N, P, or K should be split according to the percentages outlined in Table 3. Fertilizers must be distributed uniformly within a semicircle with a radius of

approximately 0.6 m in front of the youngest lateral shoot—that is, in the direction of the mat's progression.

**Table 3.** Splitting of annual N, P, and K doses for rainfed banana cultivation in the State of São Paulo.

Nutrient	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Fraction of the annual dose (%)												
N	-	20	-	15	-	-	-	15	-	20	-	30
P	-	50	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-
K	-	20	-	25	-	-	-	15	-	20	-	20

**Fertigation.** For the application of N and K fertilizers via fertigation, a reduction to 80% of the recommended rates provided in establishment or production tables is advised. This practice is most effective when coupled with drip or micro-sprinkler irrigation systems. In newly planted areas, the previously outlined monthly application schedule should be maintained. In established production areas, fertigation should be performed fortnightly throughout the year.

**Fertilization with S and micronutrients.** Apply 30 kg ha<sup>-1</sup> of S annually, particularly in soils with S-SO<sub>4</sub> levels below 15 mg dm<sup>-3</sup> in the 20-40 cm layer, using sulfur-containing fertilizer sources or gypsum application. Deficiencies of B and Zn are common in banana cultivation in São Paulo. Apply micronutrients according to diagnostic results and the rates specified in Table 4. The lower recommended rates may be applied directly to the pseudostem after harvesting the mother plant, or into the hole left by the sucker thinning tool. Higher rates can be applied together with soil fertilizers or through fertigation. Zinc sulfate and boric acid are the preferred sources. For foliar application, micronutrient supplementation should not be combined with phytosanitary treatments.

**Table 4.** Critical levels of zinc (Zn) and boron (B) in soil and banana leaves indicating a risk of deficiency, and the corresponding fertilization rates for correction.

Micronutrient	Levels		Fertilization <sup>2</sup>	
	Soil <sup>1</sup>	Leaf	Soil application	Pseudostem application
Zn	mg dm <sup>-3</sup> < 5,0	mg kg <sup>-1</sup> < 15	7	5
B	< 0,6	< 10	2	1

<sup>1</sup> Extracted with DTPA-TEA; <sup>2</sup> The prescribed fertilization rates were established for use with zinc sulfate and boric acid.

**Green manure.** It is advisable to plant an intercrop during the initial establishment phase of the banana plantation. However, this crop must not compete for water, nutrients, or sunlight. The cultivation of suitable green manure species provides benefits such as soil protection, reduction of nutrient losses through leaching and

surface runoff, and contributes to nutrient cycling through the accumulation of organic matter. Legumes have shown positive results when intercropped during the establishment of the banana plantation. In addition to the benefits common to other green manures, legumes contribute a significant amount of N to the banana plants, derived from the symbiotic fixation and subsequent accumulation of this nutrient in their biomass.

## CONCLUSIONS

The fertilization and liming recommendation system for banana cultivation in São Paulo represents a dynamic, science-based framework. Through continuous refinement and validation via targeted research and field trials, this approach successfully combines scientific rigor with practical agricultural needs. It contributes to the long-term viability of banana production by enhancing productivity and fruit quality while promoting economic efficiency and environmental sustainability. The methodology serves as a replicable model for other regions aiming to develop sustainable nutrient management practices.

## REFERENCES

- Brazilian Institute of Geography and Statistics. 2025. Municipal Agricultural Production: Temporary and Permanent Crops - 2024. *In: Municipal Agricultural Production: Temporary and permanent crops - 2024.* <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>. Accessed 21 Sep 2025
- Cantarella H, Quaggio JA, Mattos-Jr D, *et al.* 2022. Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo, 3rd edn. Instituto Agrônômico, Campinas
- Hochmuth G, Hanlon E. 2022. Principles of Sound Fertilizer Recommendations. *In: EDIS.* <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/SS527>. Accessed 21 Sep 2025
- Kopittke PM, Menzies NW. 2007. A Review of the Use of the Basic Cation Saturation Ratio and the “Ideal” Soil. *Soil Science Society of America Journal* 71:259–265. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0186>
- McLean EO, Hartwig RC, Eckert DJ, Triplett GB. 1983. Basic Cation Saturation Ratios as a Basis for Fertilizing and Liming Agronomic Crops. II. Field Studies 1. *Agron J* 75:635–639. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500040014x>
- Nyombi K. 2019. Diagnosis and management of nutrient constraints in bananas (*Musa* spp.). *In: Fruit Crops: Diagnosis and Management of Nutrient Constraints.* Elsevier, pp 651–659
- Quaggio JA. 2000. Acidez e calagem em solos tropicais. Instituto Agrônômico, Campinas
- Raij B van, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA. 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Instituto Agrônômico, Campinas

- Raij B van, Cantarella H, Quaggio JA. 2022. O sistema IAC de análise de solo. *In*: Cantarella H, Quaggio JA, Mattos Jr D, et al. (eds) Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo, 3rd edn. Instituto Agrônômico, Campinas, pp 53–60
- Teixeira LAJ, Nomura ES, Damatto ER, Fuzitani EJ. 2023. How to solve the problem of lack of foliar nutrient thresholds for other than conventional production systems? *In*: Acta Horticulturae. International Society for Horticultural Science, pp 117–124
- Teixeira LAJ, Quaggio JA, Rozane DE, Nomura ES. 2022. Banana. *In*: Cantarella H, Quaggio JA, Matos Jr D, et al. (eds) Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo, 3rd edn. Instituto Agrônômico, Campinas, pp 272–276
- Teixeira LAJ, Zambrosi FCB, Bettioli Neto JE. 2007. Avaliação do estado nutricional de bananeiras do subgrupo cavendish no Estado de São Paulo: Normas dris e níveis críticos de nutrientes. *Rev Bras Frutic* 29:613–620. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452007000300037>
- Weinert M, Simpson M. 2016. Sub tropical banana nutrition – matching nutrition requirements. NSW Department of Primary Industries

## Valores de referencia y normas CND para evaluación nutricional de banano 'Prata-Anã' en ambiente semiárido

Sérgio Luiz Rodrigues Donato<sup>1\*</sup>, Pedro Ricardo Rocha Marques<sup>1</sup>, Maria Geralda Vilela Rodrigues<sup>2</sup>, Oscar Eduardo Trujillo Obando<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Profesor Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología Baiano (IF Baiano), Sector de Agricultura, Guanambi, Bahia, Brasil, <sup>2</sup>Investigador Empresa de Investigación Agropecuaria de Minas Gerais, <sup>3</sup>Profesor Universidad Nacional de Colombia sede Palmira

**\*Autor de correspondencia:**  
Sérgio Luiz Rodrigues Donato  
sergio.donato@ifbaiano.edu.br

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Manejo de suelos y Nutrición  
química y orgánica

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

**Cita:**  
Rodrigues Donato SL, Rocha Marques PR, Vilela Rodrigues MG, Trujillo Obando OE. 2026 Valores de referencia y normas CND para evaluación nutricional de banano 'Prata-Anã' en ambiente semiárido. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 137 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26137>

### RESUMEN

El Diagnóstico de la Composición Nutricional (CND) es un método multivariado considerado preciso para la evaluación del estado nutricional por contemplar las relaciones multinutrientes. El objetivo fue establecer normas, Potencial de Respuesta a la Fertilización (PRF) y valores de referencia con el método CND, sin y con Na, para la evaluación nutricional del banano 'Prata-Anã' (AAB), en un suelo de fertilidad mejorada. El estudio contempló datos de productividad de manos (PMA) y contenidos de nutrientes en las hojas de 90 parcelas experimentales que incluyeron cinco dosis de K<sub>2</sub>O suministradas con fuentes para manejo orgánico y seis épocas de evaluación, con tres repeticiones. Las parcelas fueron divididas en población de baja (PBP) y alta productividad (PAP),  $\geq$  PMA media (36,42 t ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>), que formaron la población de referencia con 45 parcelas. El PRF, sin y con Na, indicó, para todos los nutrientes, predominancia del diagnóstico en la clase Equilibrio, consecuencia de la alta fertilidad del suelo y de la fertilización. Los diagnósticos PRF fueron similares según la prueba t en el 51,52 % de los casos. Las normas y los límites de referencia de las clases de diagnóstico son más elevados con la inclusión de Na. Por lo tanto, el método CND para la generación de valores de referencia debe ser utilizado sin la inclusión del Na. Así pues, las clases Suficientes sin Na son - en g kg<sup>-1</sup>: N (24,9-29,3), P (1,8-2,2), K (27,5-32,6), Ca (5,0-6,6), Mg (3,8-4,4) e S (1,9-2,3); em mg kg<sup>-1</sup>: B (20,4-29,5), Cu (5,4-7,5), Fe (73,3-114,0), Mn (56,0-83,8) e Zn (15,6-18,2).

**Palabras clave:** *Musa* AAB, Diagnóstico nutricional, Fertilidad del suelo, Variable multinutriente

### ABSTRACT

Nutritional Composition Diagnosis (CND) is a multivariate method considered accurate for assessing nutritional status because it considers multinutrient relationships. The objective was to establish norms, Fertilization Response Potential (FRP), and reference values using the CND method, with and without Na, for the nutritional evaluation of the 'Prata-Anã' banana (AAB) grown on improved fertility soil. The study included data on hands productivity (HPR) and leaf nutrient contents from 90 experimental plots that included five doses of K<sub>2</sub>O supplied from organically managed sources in six evaluation periods, with three replicates. Plots were divided into low (LPP) and high (HPP) populations productivity,  $\geq$  average HPR (36.42 t ha<sup>-1</sup> cycle<sup>-1</sup>), which formed the reference population of 45 plots. The FRP, with and without Na, indicated, for all nutrients, a predominance of the diagnosis in the Equilibrium class, a consequence of high soil fertility and fertilization. FRP diagnoses were similar according to the t test in 51.52 % of cases. The norms and reference limits for diagnostic classes are higher with the inclusion of Na. Therefore, the CND method for generating reference values should be used without the inclusion of Na. Thus, the Sufficient classes without Na are - in g kg<sup>-1</sup>: N (24.9-29.3), P (1.8-2.2), K (27.5-32.6), Ca (5.0-6.6), Mg (3.8-4.4) and S (1.9-2.3); em mg kg<sup>-1</sup>: B (20.4-29.5), Cu (5.4-7.5), Fe (73.3-114.0), Mn (56.0-83.8) and Zn (15.6-18.2).

**Keywords:** *Musa* AAB, Nutritional diagnosis, Soil fertility, Multinutrient variable



## INTRODUCCIÓN

El análisis de tejidos refleja la dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta, influenciada por las condiciones meteorológicas y de manejo. La concentración de nutrientes en los tejidos está correlacionada con la disponibilidad de nutrientes en el suelo y con la productividad. Sin embargo, el diagnóstico nutricional requiere asociar la evaluación del estado de los nutrientes en las plantas con base en normas, con la anamnesis del sistema de producción y las condiciones sitio-específicas, del suelo y del clima. De esta manera, el diagnóstico nutricional integrado constituye una herramienta esencial para el manejo orientado a altas productividades.

Para el banano ‘Prata-Anã’ se establecieron normas interpretativas mediante métodos univariados, en los cuales los nutrientes se evalúan de forma aislada - Rango de Suficiencia, FS (Silva, 2015, Santos *et al.*, 2022), Índices Balanceados de Kenworthy, IBK (Rodrigues Filho *et al.*, 2021); Chance Matemática, ChM (Santos *et al.*, 2022) y línea de Frontera, LF (Rodrigues Filho *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2022); método bivariado, establece relaciones directas e inversas entre pares de nutrientes - Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación, DRIS (Rodrigues Filho *et al.*, 2021; Lima Neto *et al.*, 2022); método multivariado, contempla interacciones entre todos los nutrientes - Diagnóstico de la Composición Nutricional, CND (Lima Neto *et al.*, 2022).

El CND es considerado, en forma general por la literatura (Lima Neto *et al.*, 2022), más preciso que los métodos univariados y bivariados para la evaluación del estado nutricional de los cultivos, por contemplar las relaciones multinutrientes. Sin embargo, los límites inferiores y superiores de los valores de referencia de los nutrientes, generados por este método, aumentan con la cantidad de elementos involucrados, lo que puede comprometer el diagnóstico nutricional. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando se incluye el Na, un nutriente no esencial para el banano, pero con presencia considerable en la planta en función del suelo y/o del agua de riego, en cultivos en ambientes semiáridos. Así, el objetivo fue establecer normas, Potencial de Respuesta a la Fertilización (PRF) y valores de referencia con el método CND, sin y con Na, para la evaluación nutricional del banano ‘Prata-Anã’ (AAB), en un suelo de fertilidad mejorada.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó con base de datos (Santos *et al.*, 2022) proveniente de experimento conducido con el banano ‘Prata-Anã’ (AAB), plantado con un espaciamiento 2,0 x 2,5 m (Marques *et al.*, 2022), en Guanambi, BA, Brasil (14°17'38"

S, 42°41'42" O, altitud media de 537 m). El clima es semiárido, cálido y seco, con estación seca bien definida en invierno y estación lluviosa entre octubre y marzo. La precipitación media anual es de 671,8 mm, y la temperatura media es 26,1 °C.

El suelo del área experimental fue clasificado como Latosolo Vermelho-Amarelo, de textura media, correspondiente a un Oxisol. Sin embargo, después de correcciones realizadas durante dos décadas mediante aplicaciones de fertilizantes orgánicos y químicos, junto con la incorporación de residuos de cultivos, se logró construir su fertilidad, como se ilustra en lo Cuadro 1 (Marques *et al.*, 2022).

**Cuadro 1.** Medias y desviaciones estándar de los atributos químicos del suelo con fertilidad construida, cultivado con banano ‘Prata-Anã’, antes del trasplante, en los horizontes de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m. Guanambi, BA.

Horizontes (m)	pH <sup>1</sup>	MO <sup>2</sup>	P <sup>3</sup>	K <sup>3</sup>	Na <sup>3</sup>	Ca <sup>4</sup>	Mg <sup>4</sup>	Al <sup>4</sup>	H+Al <sup>5</sup>	SB	
		g kg <sup>-1</sup>	--- mg dm <sup>-3</sup> ---	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----							
0,0-0,2	7,4±0,2	12,3±2,5	468,3±32,2	493,0±46,8	0,1±0	4,6±0,5	1,7±0,1	0	0,8±0	7,6±0,4	
0,2-0,4	7,3±0,1	1,7±0,6	229,1±67,5	372,0±61,5	0,1±0	3,5±0,3	1,1±0,2	0	0,8±0,1	5,7±0,4	
Muestreo	T	V	M	B <sup>6</sup>	Cu <sup>3</sup>	Fe <sup>3</sup>	Mn <sup>3</sup>	Zn <sup>3</sup>	Prem <sup>7</sup>	CE	
	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	----- % -----	----- mg dm <sup>-3</sup> -----							mg L <sup>-1</sup>	ds m <sup>-1</sup>
0,0-0,2	8,4±0,5	91±0	0	0,9±0,3	2,2±0,3	22,3±6,2	46,5±1,3	40,8±11,8	43,6±1,0	1,5±0,2	
0,2-0,4	6,5±0,4	89±0,6	0	1,0±0,1	1,2±0,1	26,8±7,6	27,7±1,1	8,7±2,4	42,2±2,5	1,3±0,2	

<sup>1</sup>pH en agua; <sup>2</sup>Colorimetría; <sup>3</sup>Extractor: Mehlich<sup>-1</sup>; <sup>4</sup>Extractor: KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>5</sup>pH SMP; <sup>6</sup>Extractor: CaCl<sub>2</sub>; <sup>7</sup>Extractor: Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg L<sup>-1</sup> de P en HOAc 2 mol L<sup>-1</sup>; <sup>8</sup>Solución de equilibrio de P; SB, Suma de bases; t, CTC efectiva = SB; T, CTC a pH 7; V, Saturación por bases; M, Saturación por aluminio; P-rem, Fósforo residual; CE, Conductividad eléctrica.

El estudio contempló una base de datos (Santos *et al.*, 2022) con productividad de manos (PMA) y contenidos de nutrientes en las hojas de 90 parcelas experimentales conducidas en bloques al azar, que incluyeron cinco dosis de K<sub>2</sub>O - 0; 200; 400; 600 y 800 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, suministradas con fuentes para manejo orgánico, estiércol de ganado y harina de roca, y seis épocas de evaluación, - 210; 390; 570; 750; 930 y 1.110 días después de la siembra, con tres repeticiones (Marques *et al.*, 2022).

Las 90 parcelas fueron divididas en población de baja (PBP) y alta productividad (PAP), ≥ PMA media (36,42 t ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>), que formaron la población de referencia compuesta por 45 parcelas, con PMA 43,21 ± 5,16 ( $\bar{x} \pm s\bar{x}$ ), que se utilizaron para generar las normas y valores de referencia.

Las normas del Diagnóstico de la Composición Nutricional (CND) fueron establecidas a partir de la media aritmética y la desviación estándar de las variables multinutrientes en la PAP (TRASPADINI *et al.*, 2018). Las relaciones multivariadas (vNutri<sub>i</sub>) calculadas mediante la razón entre la concentración del nutriente (vNutri<sub>i</sub>)

expresada en  $\text{g kg}^{-1}$  y la media geométrica de las concentraciones de los constituyentes de la materia seca (mGeo), ec. (1):  $V_{\text{Nutri}_i} = (v_{\text{Nutri}_i}/m_{\text{Geo}})$   
Para  $i = 1$  la  $n$ , utilizando datos sin transformación logarítmica. La mGeo estimada por la raíz de orden  $n$  del producto de los contenidos de nutrientes y del valor R, en el que  $n$  es el número de componentes evaluados, incluyendo el componente R, conforme a la ec. (2):

$$m_{\text{Geo}} = \sqrt[n+1]{v_{\text{N}} \times v_{\text{P}} \times v_{\text{K}} \times v_{\text{Ca}} \times v_{\text{Mg}} \times v_{\text{S}} \times v_{\text{B}} \times v_{\text{Cu}} \times v_{\text{Fe}} \times v_{\text{Mn}} \times v_{\text{Zn}} \times v_{\text{Na}} \times R}$$

Para el cálculo de R se utilizó la ec. (3):  $R = (1000 - \sum_{i=1}^n v_{\text{Nutri}_i})$

En la que  $n$  representa los nutrientes considerados y  $v_{\text{Nutri}_i}$  el contenido de cada nutriente. Se consideraron 11 y 12 nutrientes para los cálculos sin y con inclusión de Na, respectivamente. R es la diferencia entre 1.000 g de materia seca y la suma de los nutrientes (Parent y Dafir, 1992).

Los índices CND (ICND o  $I_{\text{Nutri}}$ ) fueron obtenidos por la estandarización de las variables multinutrientes de la parcela evaluada ( $V_{\text{Nutri}_i}$ ) en relación con la media de la PAP ( $V_{\text{Nutri}_i}^*$ ), dividida por la desviación estándar ( $s_{\text{Nutri}_i\text{PAP}}$ ), ec. (4):

$$I_{\text{Nutri}_i} = \left[ \frac{(V_{\text{Nutri}_i} - V_{\text{Nutri}_i}^*)}{s_{\text{Nutri}_i\text{PAP}}} \right]$$

El establecimiento de las clases de diagnóstico, valores de referencia, siguió criterios análogos al DRIS (Beaufils, 1973), con intervalos en función de las medias y de las desviaciones estándar ( $s\bar{x}$ ) de las normas CND: deficiente ( $< -4/3s\bar{x}$ ), tendencia a suficiente ( $-4/3s\bar{x}$  a  $-2/3s\bar{x}$ ), suficiente ( $-2/3s\bar{x}$  a  $2/3s\bar{x}$ ), alto ( $2/3s\bar{x}$  a  $4/3s\bar{x}$ ) y tendencia al exceso ( $\geq 4/3s\bar{x}$ ). Los PRF y los límites inferiores ( $L_i$ ) y superiores ( $L_s$ ) de las clases diagnósticas Suficiente de cada nutriente con y sin la inclusión de Na, fueron comparados mediante la prueba  $t$  ( $p \leq 0,01$ ).

Por último, el Potencial de Respuesta a la Fertilización (PRF) se estableció a partir del cálculo del Balance Nutricional Medio (IBNm) constituido por las medias de los valores absolutos de los índices nutricionales  $I_{\text{Nutri}_i}$  (ICND) considerados en el estudio, ecuación. (5):  $\text{IBNm} = \frac{\sum_{i=1}^n |I_{\text{Nutri}_i}|}{n}$  en que:  $I_{\text{Nutri}_i}$  es el índice CND del nutriente  $i$ , y  $n$  la cantidad de nutrientes considerados. El PRF consideró tres clases de diagnóstico: Equilibrio, cuando el valor absoluto del índice CND sea menor o igual al IBNm; Deficiencia, cuando el índice CND sea negativo y, en valor absoluto, mayor que el IBNm; Exceso, si el índice CND es positivo y, en valor absoluto, mayor que el IBNm. Posteriormente, las frecuencias relativas de ocurrencia de las clases PRF fueron graficadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el enfoque multivariado CND, el valor de cada nutriente influye en los valores de referencia (Cuadro 2), ya que incorpora la media geométrica, raíz enésima del producto de los contenidos de los nutrientes y del valor R, diferencia entre la materia seca total y la suma de los nutrientes.

Por ejemplo, para K, nutriente más extraído y exportado por el banano, sin la inclusión de Na, la  $\bar{x}CND$  fue 30,1 g kg<sup>-1</sup>; y, los  $Li_i$  y  $Ls_i$  de la clase suficiente, 27,5 e 32,6 g kg<sup>-1</sup>. Estos valores son compatibles con los determinados por otros métodos, FS, ChM y LF con la misma base de datos (Santos *et al.*, 2022) y con FS (Silva, 2015). Por otro lado, con la inclusión de Na, la  $\bar{x}CND$  paso a 39,9 g kg<sup>-1</sup>; los  $Li_i$  y  $Ls_i$  36,6 y 43,2 g kg<sup>-1</sup>, por lo tanto, asumiendo valores mayores, en función de la inclusión de un nutriente. Para el N, sin incluir el Na, los  $Li_i$  y  $Ls_i$  de la clase suficiente fueron 24,9 e 29,3 g kg<sup>-1</sup>, similar a los estimados por Silva (2015), mientras que con la inclusión de Na pasaron a 33,00 e 39,6 g kg<sup>-1</sup> valores más altos a los obtenidos por Santos *et al.* (2022).

Así, aunque es considerado más preciso y robusto por la literatura en general debido a su enfoque multivariado (Lima Neto *et al.*, 2022), a principal crítica al método CND presentada aquí es el hecho de aumentar los valores de referencia en función de la cantidad de nutrientes involucrados, lo que puede generar valores sobrestimados para las clases diagnósticas. A pesar de ello, los autores antes mencionados constataron similitud entre los valores de referencia obtenidos con DRIS y CND considerando el Na, aunque sin comparar la ausencia y la inclusión de dicho elemento.

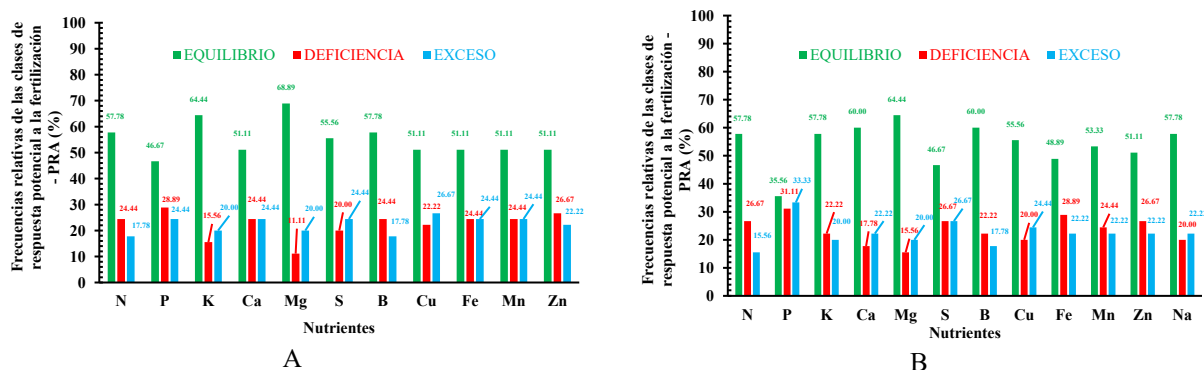
**Cuadro 2.** Normas y valores de referencia para el diagnóstico nutricional del banano ‘Prata-Anã’ generados mediante el método de Diagnóstico de la Composición Nutricional (CND) sin y con inclusión de Na en la variable multinutriente. Guanambi, BA.

Clases diagnósticas sin inclusión de Na									
	DEF	TSF	SUF	ALT	TEX	$\bar{x}CND$	$s\bar{x}CND$	CVCND	
						(g kg <sup>-1</sup> )			
Macronutrientes (g kg <sup>-1</sup> )									
N	22,8	22,8 - 24,9	24,9 - 29,3	29,3 - 31,4	>31,4	27,1	3,2	11,93	%
P	<1,7	1,7 - 1,8	1,8 - 2,2	2,2 - 2,4	>2,4	2,0	0,3	13,17	
K	<25,0	25,0 - 27,5	27,5 - 32,6	32,6 - 35,2	>35,2	30,1	3,8	12,69	
Ca	<4,2	4,2 - 5,0	5,0 - 6,6	6,6 - 7,5	>7,5	5,8	1,2	20,83	
Mg	<3,6	3,6 - 3,8	3,8 - 4,4	4,4 - 4,6	>4,6	4,1	0,4	9,67	
S	<1,8	1,8 - 1,9	1,9 - 2,3	2,3 - 2,4	>2,4	2,1	0,3	12,44	
						(mg kg <sup>-1</sup> )			
Micronutrientes (mg kg <sup>-1</sup> )									
B	<15,9	15,9 - 20,4	20,4 - 29,5	29,5 - 34,0	>34,0	25,0	6,8	27,14	%
Cu	<4,4	4,4 - 5,4	5,4 - 7,5	7,5 - 8,5	>8,5	6,5	1,6	24,09	
Fe	<53,0	53,0 - 73,3	73,3 - 114,0	114,0 - 134,3	>134,3	93,6	30,5	32,57	
Mn	<42,1	42,1 - 56,0	56,0 - 83,8	83,8 - 97,6	>97,6	69,9	20,8	29,79	
Zn	<14,3	14,3 - 15,6	15,6 - 18,2	18,2 - 19,5	>19,5	16,9	1,9	11,37	
Clases diagnósticas con inclusión de Na									
	DEF	TSF	SUF	ALT	TEX	$\bar{x}CND$	$s\bar{x}CND$	CVCND	
						(g kg <sup>-1</sup> )			
Macronutrientes (g kg <sup>-1</sup> )									

N	<30,0	30,0 - 33,0	33,0 - 39,0	39,0 - 42,0	>42,0	36,0	4,5	12,56
P	<2,2	2,2 - 2,4	2,4 - 2,9	2,9 - 3,1	>3,1	2,7	0,4	13,44
K	<33,3	33,3 - 36,6	36,6 - 43,2	43,2 - 46,6	>46,6	39,9	5,0	12,47
Ca	<5,6	5,6 - 6,7	6,7 - 8,9	8,9 - 10,0	>10,0	7,8	1,7	21,31
Mg	<4,7	4,7 - 5,0	5,0 - 5,8	5,8 - 6,2	>6,2	5,4	0,6	10,63
S	<2,3	2,3 - 2,5	2,5 - 3,1	3,1 - 3,3	>3,3	2,8	0,4	14,42
Micronutrientes (mg kg <sup>-1</sup> )						(mg kg <sup>-1</sup> )		%
B	<20,9	20,9 - 27,1	27,1 - 39,3	39,3 - 45,4	>45,4	33,2	9,2	27,63
Cu	<5,7	5,7 - 7,2	7,2 - 10,0	10,0 - 11,4	>11,4	8,6	2,1	24,97
Fe	<72,0	72,0 - 98,0	98,0 - 150,0	150,0 - 176,0	>176,0	124,0	39,0	31,43
Mn	<55,9	55,9 - 74,4	74,4 - 111,4	111,4 - 129,9	>129,9	92,9	27,7	29,87
Zn	<19,0	19,0 - 20,7	20,7 - 24,2	24,2 - 25,9	>25,9	22,4	2,6	11,64
Na	<15,3	15,3 - 25,7	25,7 - 46,7	46,7 - 57,2	>57,2	36,2	15,7	43,41

$\bar{x}$ CND: media CND, s $\bar{x}$ CND: desviación estándar CND y CVCND: coeficiente de variación; DEF: deficiente; TSF: tendencia a suficiente; SUF: suficiente; ALT: alto; e TEX: tendencia al exceso. Número de parcelas experimentales, n = 45, en la población de alta productividad (PAP).

El PRF, sin y con Na, indicó, para todos los nutrientes, predominancia del diagnóstico en la clase Equilibrio (Figura 1), consecuencia de la alta fertilidad del suelo y del aporte de nutrientes vía fertilización. Los diagnósticos PRF fueron similares según la prueba t ( $p \leq 0,01$ ) en el 51,52 % de los casos. Se registraron diferencias significativas para P, Ca, S y Cu en todas las clases diagnósticas y, para K y Mg, en las clases Equilibrio y Deficiente. Los valores de las normas y de los  $L_i$  e  $L_s$  de las clases Suficiente fueron más elevados para todos los nutrientes cuando se incluyó el Na. Las diferencias fueron significativas ( $p \leq 0,01$ ) en el 72,73 % de los casos, con excepción de B, Fe y Mn.



## CONCLUSIONES

Las normas y los límites de referencia de las clases de diagnóstico son más elevados con la inclusión de Na. Por lo tanto, para banano 'Prata-Anã' el método CND

para la generación de valores de referencia debe ser utilizado sin la inclusión del Na. Así pues, las clases Suficientes sin Na son - en  $\text{g kg}^{-1}$ : N (24,9-29,3), P (1,8-2,2), K (27,5-32,6), Ca (5,0-6,6), Mg (3,8-4,4) e S (1,9-2,3); em  $\text{mg kg}^{-1}$ : B (20,4-29,5), Cu (5,4-7,5), Fe (73,3-114,0), Mn (56,0-83,8) e Zn (15,6-18,2).

## REFERENCIAS

- Beaufils ER. 1973. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS): a general scheme for experimentation and calibration based on principles develop from research in plant nutrition. Soil Science Bull No 1. University of Natal. Pietermaritzburg, South Africa. 132p.
- Lima Neto AJ, Natale W, Rozane DE, Deus JAL, Rodrigues Filho VA. 2022. Establishment of DRIS and CND Standards for Fertigated 'Prata' Banana in the Northeast, Brazil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 22:765-777.
- Marques PRR, Donato SLR, São José AR, Rosa RCC, Arantes AM. 2022. Nutritional status and production of 'Prata-Anã' (AAB) and 'BRS Platina' (AAAB) banana plants with organic fertilization. *Nativa*, 10:60-68.
- Parent LE and Dafir M. 1992. A Theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal American Society Horticultural Science* 117:239-242.
- Rodrigues Filho VA, Neves JCL, Donato SLR, Guimarães BVC. 2021. Potential nutrient-response curves and sufficiency ranges for 'Prata-Anã' banana cultivated under two environmental conditions. *Scientia Agricola* 78: e20200158.
- Santos MA, Donato SLR, Neves JCL, Marques PRR, Pereira MCT, Rodrigues MG. 2022. Nutrient reference values for 'Prata-Anã' banana in improved chemical fertility soils. *Revista Brasileira de Fruticultura* 44:e-570.
- Silva JTA. 2015. Solo, adubação e nutrição para bananeira. *Informe Agropecuário* 36:74-83.
- Traspadini EIF, Prado RM, Vaz GJ, Silva FC, Mancini A, Silva GP, Santos EH, Wadt PGS. 2018. Guia prático para aplicação do método da Diagnose da Composição Nutricional (CND): exemplo de uso na cultura da Cana-de-Açúcar. Documentos 160. Embrapa Informática Agropecuária. Campinas, Brasil. 30p.

## Diagnóstico de la calidad del suelo en dos condiciones de producción de banano y un bosque secundario de Costa Rica

José P. Vargas Fernández<sup>1\*</sup>, Lidieth Uribe Lorío<sup>2</sup>, Ronald Romero Calderón<sup>3</sup>, Jorge A. Leiva Sanabria<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Agronomía. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. <sup>2</sup>Facultad de Agronomía. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. <sup>3</sup>Fresh Del Monte Produce. San José, Costa Rica. <sup>4</sup>Escuela de Agronomía. Sede Guanacaste. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

**\*Autor de correspondencia:**

José P. Vargas Fernández  
jose.vargasfernandezcr.ac.cr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Manejo de suelos y Nutrición  
química y orgánica

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

**Cita:**  
Vargas Fernández JP, Uribe Lorío L, Romero Calderón R, Leiva Sanabria JA. 2026. Diagnóstico de la calidad del suelo en dos condiciones de producción de banano y un bosque secundario de Costa Rica. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 138  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26138>

### RESUMEN

La disminución de la calidad del suelo afecta la sostenibilidad de la producción de banano en Costa Rica. Mejorar los factores limitantes del suelo aumenta su calidad y asegura la continuidad productiva. El objetivo de este estudio fue comparar la calidad del suelo en condiciones de alta productividad (AP), baja productividad (BP) y un bosque secundario maduro (BM) en la Región Huetar Atlántica, mediante indicadores e índices de calidad. Se recolectaron 25 muestras compuestas por condición (0–30 cm) y se analizaron indicadores químicos, físicos y biológicos del suelo, junto con variables biométricas y nutricionales de la planta. La evaluación se realizó en tres etapas: (I) selección de indicadores en un conjunto total (TDS) y dos reducidos (MDS-PCA y MDS-EO); (II) interpretación mediante las metodologías marco de evaluación del manejo de suelos (SMAF) y distribución normal acumulativa (CND), que asignan puntajes entre 0 y 1; y (III) cálculo de índices de calidad (InCS) bajo un enfoque aditivo simple. Los resultados mostraron que BM presentó mayor carbono orgánico total, biomasa microbiana y diversidad funcional. AP sobresalió en desempeño biométrico, retorno de biomasa y actividad enzimática, mientras que BP se caracterizó por compactación subsuperficial, necrosis radicular y altas concentraciones de Fe y Mn, aunque con mayores contenidos de nutrientes en suelo y tejido foliar. La integración de los indicadores reflejó un gradiente de calidad BM > AP > BP, consistente con el desempeño productivo. Se concluye que los conjuntos reducidos, especialmente MDS-PCA, fueron más sensibles y eficientes que el TDS. Ambas metodologías fueron consistentes, aunque la CND se limitó por no incluir indicadores biológicos.

**Palabras clave:** Indicadores, Índice de calidad de suelo, Productividad

### ABSTRACT

Soil quality decline threatens the sustainability of banana production in Costa Rica. Addressing soil limiting factors improves its quality and ensures long-term productivity. The objective of this study was to compare soil quality under high productivity (AP), low productivity (BP), and a mature secondary forest (BM) in the Huetar Atlántica region, using soil quality indicators and indices. A total of 25 composite samples per condition (0–30 cm) were collected, and chemical, physical, and biological soil indicators were analyzed, along with plant biometric and nutritional variables. The evaluation included three steps: (I) selection of indicators in a total set (TDS) and two reduced sets (MDS-PCA and MDS-EO); (II) interpretation using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) and Cumulative Normal Distribution (CND) methodologies, which assign scores between 0 and 1; and (III) integration of indicators into soil quality indices (InCS) using an additive approach. Results showed that BM presented higher total organic carbon, microbial biomass, and functional diversity. AP stood out for superior biometric performance, biomass return, and enzymatic activity, while BP was characterized by subsurface compaction, root necrosis, and high Fe and Mn concentrations, although it also showed higher contents of macro- and micronutrients in soil and foliar tissue. The integration of indicators reflected a soil quality gradient of BM > AP > BP, consistent with the productivity levels observed. It is



concluded that reduced indicator sets, particularly MDS-PCA, were more sensitive and efficient than the full set. Both methodologies were consistent, although CND was limited by the absence of biological indicators.

**Keywords:** Indicators, Soil quality index, Productivity

## INTRODUCCIÓN

El banano es una de las frutas más consumidas en el mundo y figura entre los principales productos de exportación de Costa Rica, donde se cultiva en más de 42 000 hectáreas y genera alrededor de 100 millones de cajas anuales para los mercados internacionales. Además de su peso en la economía nacional, este cultivo ha tenido un papel histórico en el desarrollo social y productivo de la Región Huetar Atlántica, constituyéndose como un pilar de empleo y dinamización de comunidades rurales (CORBANA, 2024).

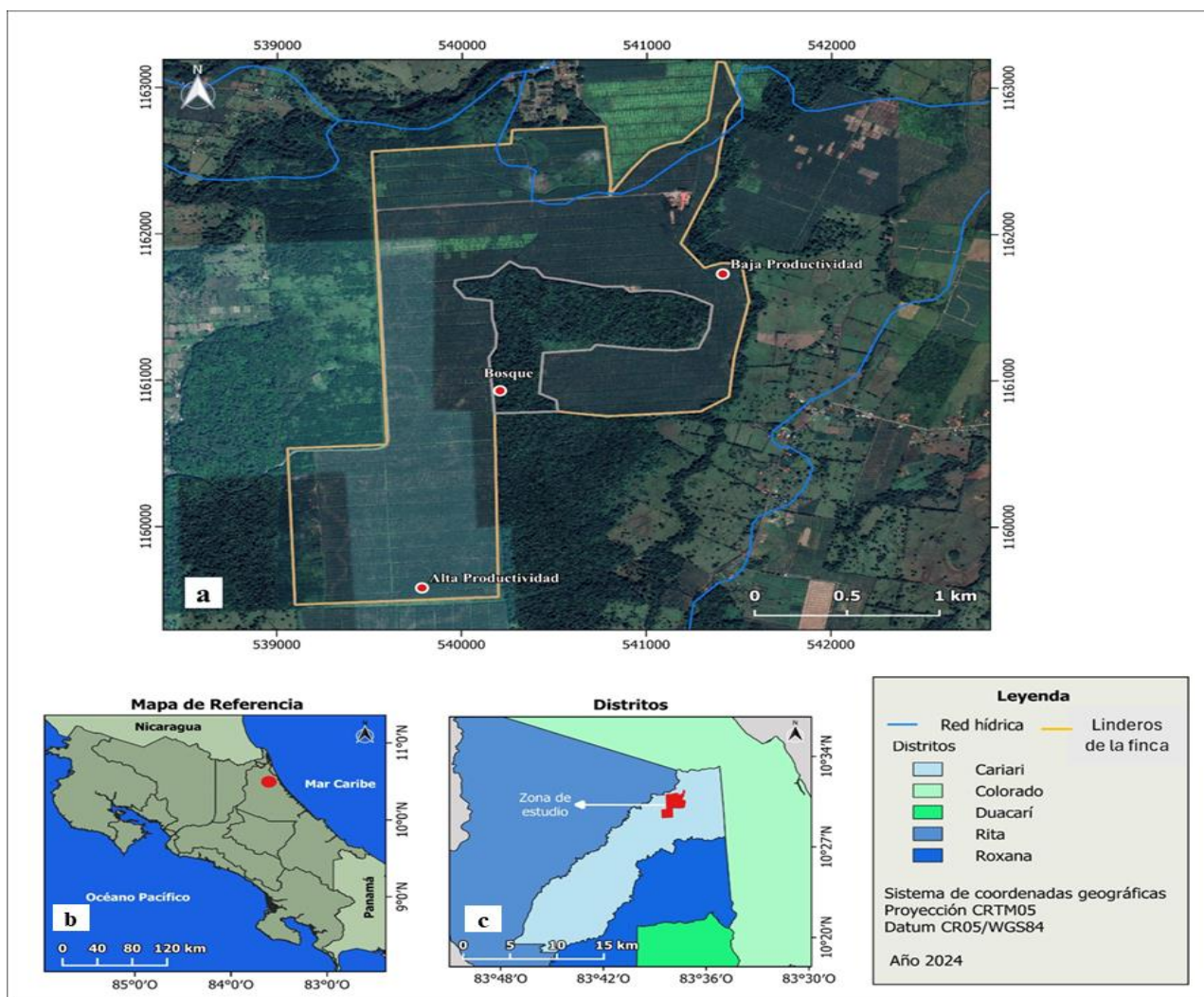
El crecimiento de la actividad bananera se sustentó en un modelo de monocultivo intensivo que, aunque permitió responder a la creciente demanda mundial, implicó un uso elevado de agroquímicos y prácticas de manejo enfocadas en maximizar la productividad lograda y sostenida hasta el día de hoy (CORBANA, 2024). Este proceso también se vinculó con la expansión sobre áreas forestales y con el establecimiento de plantaciones en suelos de baja aptitud agrícola, lo que aceleró el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Bellamy, 2013).

A mediano plazo, la degradación del suelo se tradujo en la reducción de la productividad, documentada en distintos países de América Latina y en Costa Rica. En plantaciones con más de siete años de explotación continua, se han reportado disminuciones de 100 a 300 cajas por hectárea al año, mientras que en otras regiones como Panamá o Venezuela las pérdidas fueron aún más marcadas, reflejando un patrón regional de disminución en el rendimiento asociado a la pérdida de calidad del suelo (Vargas-Fernández, 2024).

Frente a este panorama, los índices de calidad de suelo, construidos a partir de indicadores físicos, químicos y biológicos, se han consolidado como una herramienta para evaluar y monitorear la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Bünemann et al., 2018). En este marco, el presente trabajo comparó la calidad del suelo bajo tres condiciones contrastantes: una plantación de alta productividad, otra de baja productividad y un bosque secundario, en la Región Huetar Atlántica de Costa Rica, con el fin de generar evidencia actualizada que oriente prácticas de manejo más sostenibles.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en finca Tortuguero (Cariari, Pococí, Limón), una zona de bosque muy húmedo tropical con 5 000 - 6 000 mm de lluvia anual,  $\sim 26$  °C de temperatura media y altitudes de 0 - 30 m s. n. m (Figura 1). Se evaluaron tres condiciones contrastantes: una plantación de alta productividad (AP) ( $\sim 2\,433$  cajas  $\text{ha}^{-1}$  año $^{-1}$ ), otra de baja productividad (BP) ( $\sim 2\,144$  cajas  $\text{ha}^{-1}$  año $^{-1}$ ), ambas sembradas en 1992 con *Musa* AAA ‘Valery’, y un bosque secundario maduro (BM) sin intervención por  $\sim 30$  años. Los suelos se clasificaron como *Dystric Fluventic Eutrudepts* (BP) y *Andic Dystrudepts* (AP y BM).



**Figura 1.** Ubicación de los sitios de estudio en finca Tortuguero (a). Localización de la finca en la provincia de Limón (b) y en el distrito de Cariari (c).

El muestreo (octubre–noviembre 2023) se efectuó en ~1,5 ha por condición (AP/BP) mediante recorridos en zigzag; en BM se definió un polígono de 4,5 ha. Se recolectaron 25 muestras compuestas de suelo (0 - 30 cm) por condición (tres submuestras por punto), con separaciones de 20 - 60 m (AP/BP) y 10 - 12 m (BM). En AP/BP las muestras se tomaron en la banda de fertilización frente al hijo de sucesión; en BM se muestreó en claros para evitar raíces de árboles grandes. Adicionalmente, se abrieron fosas 2×2×2 m para medir algunas variables fisicoquímicas a mayor profundidad.

En AP y BP se midieron variables biométricas en 100 plantas por condición (hojas funcionales, circunferencia, altura del hijo y número de manos por racimo) en estados de floración y 11–12 semanas post-embolse. El estado nutricional se evaluó en hoja 3 (segmento central del semilimbo, sin vena), con 25 muestras foliares por sitio. Para el sistema radical, se tomaron 25 monolitos por condición en la interfase madre-hijo (hoyos de 15×15×30 cm; 6 750 cm<sup>3</sup>), recolectando la biomasa de la raíz funcional y contando los nematodos fitoparásitos y saprófitos. En suelo se determinaron nutrientes (Mehlich III – ICP/OES), pH y CE, acidez/Al intercambiable, carbono orgánico total (combustión seca), y propiedades físicas: textura (hidrómetro), densidad aparente, resistencia a la penetración, retención de humedad (CC y PMP) y estabilidad de agregados (tamizado en húmedo). En tejido foliar se analizaron macro y micronutrientes (digestión asistida por microondas e ICP/OES; N por combustión). La dimensión biológica incluyó carbono de biomasa microbiana, respiración, deshidrogenasa y β-glucosidasa, además de la huella metabólica con Biolog® EcoPlate™ (AWCD a 72 h, índices de Shannon y Simpson y similitud), leídos a 590 nm.

La calidad del suelo se abordó en tres pasos: (I) selección de indicadores (ICS), un conjunto total (TDS), uno reducido por PCA (MDS-PCA) y otro por criterio de expertos (MDS-EO); (II) interpretación mediante el Marco de evaluación del manejo de suelos (SMAF por sus siglas en inglés) (Andrews et al., 2004) y Distribución Normal Acumulativa (CND por sus siglas en inglés) (Moebius-Clune et al., 2016), asignando puntajes entre 0-1 a cada indicador utilizando curvas no lineales; y (III) integración en índices (InCS) bajo un enfoque aditivo simple. Se calcularon índices con combinaciones químico-físico-biológicas (qfb), químico-físicas (qf) y completos (c) que incluyen las químico-físicas y las variables biométricas, raíces y estado nutricional foliar. El análisis estadístico contempló descriptivos, verificación de normalidad y homocedasticidad, ANOVA de una vía ( $\alpha = 0,05$ ), transformaciones cuando fue necesario, Tukey para comparaciones múltiples, PCA (varianza acumulada

$\geq 80$  %, eigenvalues  $> 1$ , rotación varimax) y correlaciones de Pearson para depurar redundancias y retener los indicadores más informativos.

## RESULTADOS Y DISCUSION

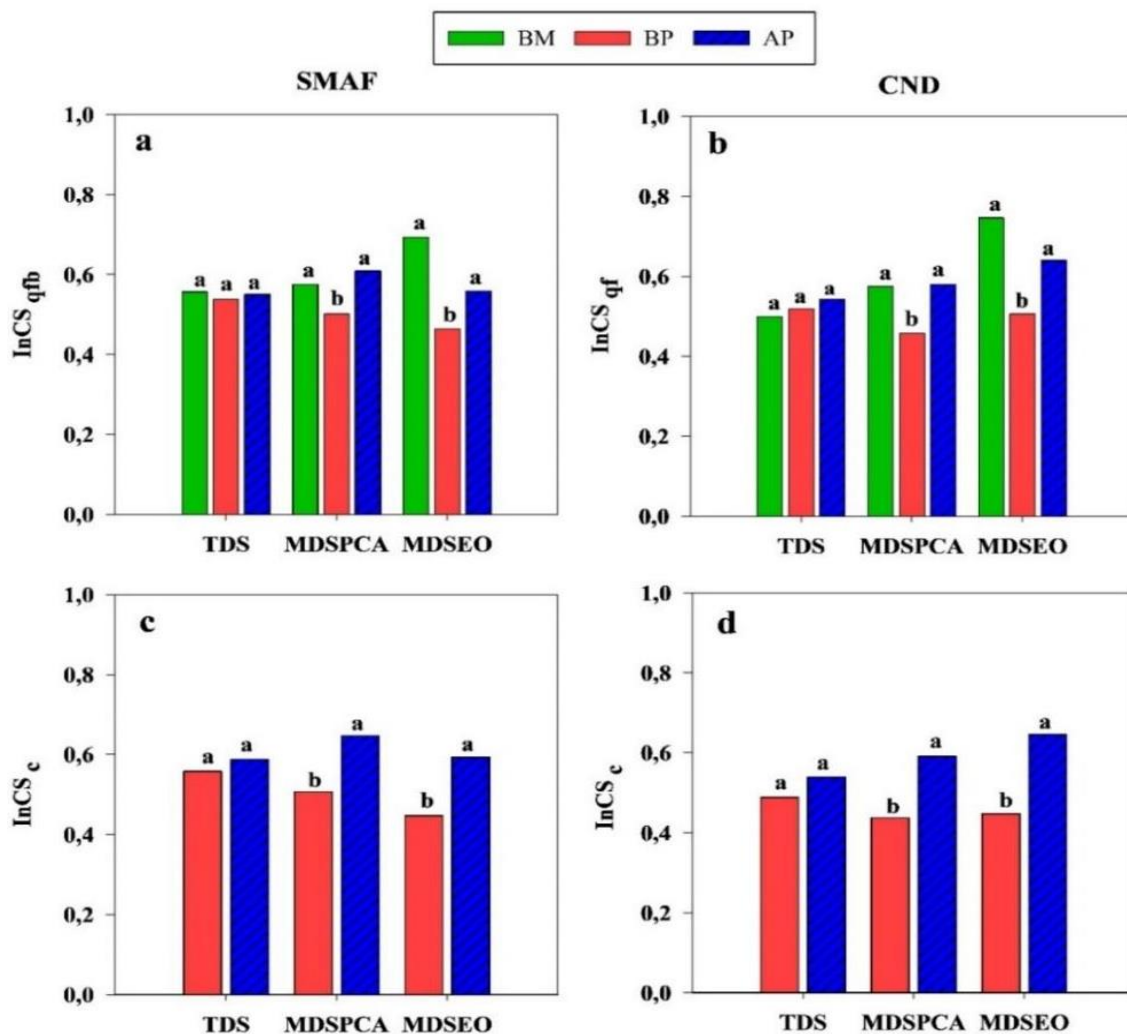
La textura explicó buena parte de los contrastes observados: AP (alta productividad) y BM (bosque maduro), clasificados como Franco Arenoso y Franco Limoso, muestran potencial edáfico alto para banano, mientras que BP (baja productividad), Franco Arcillo Limoso, presenta potencial medio-bajo y mayor compactación (Jaramillo y Vázquez 1980). Esa compactación en BP (0 - 100 cm) coincide con raíces necrosadas y alta resistencia del suelo a la penetración subsuperficial (RSSP), pese a que el agua disponible se mantuvo cercano al rango óptimo (~20 % de humedad volumétrica) (Vaquero 2003). La mayor estabilidad de agregados en BP se asocia al mayor limo y arcilla, y en BM al mayor carbono orgánico total (COT); en AP, la arena redujo dicha estabilidad.

La mayor disponibilidad de nutrientes en suelos cultivados, sobre todo en BP, se explica por su mayor capacidad de intercambio catiónico y por menor extracción de nutrientes asociada al bajo vigor, mientras BM refleja un ciclaje natural más equilibrado (Pérez y Torres-Bazurto 2020). El COT superior en BM y alto en AP (por el retorno de ~66 % de la biomasa en plantaciones vigorosas) contrasta con BP. Las concentraciones elevadas de Fe y Mn en BP, junto con rasgos redoximórficos y pérdida de raíz funcional a 90-150 cm, sugieren limitaciones de drenaje (Vaquero 2003). A nivel de planta, AP confirmó mayor desempeño en las variables biométricas: circunferencia del pseudotallo en floración y cosecha, hojas por planta en floración, altura del hijo en cosecha y manos por racimo, mientras que las mayores concentraciones foliares de Ca, Mg, Mn, Zn y Cu en BP fueron coherentes con su disponibilidad en el suelo.

En el plano biológico, BM sobresalió en desarrollo de color promedio medido con Biolog® EcoPlate™, diversidad funcional (índice de Shannon), riqueza de sustratos y carbono de la biomasa microbiana; en AP destacó la actividad de la enzima deshidrogenasa, mientras que en BP se registraron los valores más bajos de actividad de la enzima  $\beta$ -glucosidasa (Durango *et al.* 2015). Estas diferencias podrían estar influenciadas por el COT, que fue superior en BM y proporcionó fuentes estables de carbono que favorecieron la acumulación de biomasa microbiana, mientras que en los sitios cultivados (AP y BP), con menor diversidad y cantidad en los aportes de fuentes de COT habría estimulado principalmente la actividad biológica enzimática (Henríquez *et al.*, 2014).

Integrando la calidad de suelo, los índices (InCS) ubican a BM en la parte alta, AP en nivel intermedio y BP en regular, alineando el gradiente edáfico-biológico con el productivo (Figura 2). Los conjuntos reducidos superan al total (TDS, 51 indicadores) por evitar redundancias y enfocarse en variables diagnósticas: el MDS-PCA (conjunto reducido por análisis de componentes principales) ofrece una selección objetiva de indicadores (textura, K y Na, pH, COT, RSSP y variables biométricas), mientras el MDS-EO (conjunto reducido por criterio experto y literatura) coincide en indicadores esenciales (textura, CIC, pH, acidez intercambiable, COT, RSSP y variables biométricas del cultivo), ambos con menores costos de medición que TDS (Marion *et al.* 2022).

Tanto SMAF como CND fueron consistentes para estimar índices de calidad de suelo, aunque presentan diferencias en su aplicabilidad. SMAF es una herramienta ampliamente validada y flexible que integra indicadores físicos, químicos y biológicos, pero sus rangos de interpretación, ajustados al cultivo y sitio, limita su extrapolación sin realizar ajustes. En contraste, CND utilizó una base de datos local, por lo que ofrece una interpretación objetiva a partir de promedios y desviaciones estándar, lo que la hace eficiente cuando existe amplia información disponible; sin embargo, su principal limitación es la ausencia de indicadores biológicos en la base de datos, lo que restringe su uso en contextos con poca información.



**Figura 2.** Índices de calidad de suelo en bosque (BM) y banano de alta (AP) y baja (BP) productividad, obtenidos con tres conjuntos de indicadores (TDS, MDS PCA y MDS EO) y dos metodologías, marco de evaluación del manejo de suelos (SMAF) y distribución normal acumulativa (CND).  $InCS_{qfb}$ : índice combina indicadores químico-físico-biológicos.  $InCS_{qf}$ : índice combina indicadores químico-físicos.  $InCS_c$ : índice combina indicadores químico-físicos-biológicos y las variables biométricas, raíces y estado nutricional foliar. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

## CONCLUSIONES

En conclusión, la condición AP presentó mejores indicadores físicos, biológicos y biométricos, lo que se reflejó en un mayor índice de calidad en comparación con la condición BP. En relación con BM, ambos sistemas cultivados mostraron mayor compactación, fertilidad química y acidez, pero menor carbono orgánico total y actividad biológica, resultando en la jerarquía de calidad  $BM > AP > BP$ .

Las metodologías empleadas (SMAF y CND) fueron consistentes, aunque la CND presentó limitaciones por no incluir indicadores biológicos. Además, los conjuntos de indicadores reducidos (MDS PCA y MDS EO) demostraron mayor sensibilidad que el total de indicadores (TDS), destacando el MDS PCA como la opción más robusta al minimizar redundancias y subjetividades, por lo que se recomienda su uso en evaluaciones de la calidad del suelo en plantaciones de banano bajo condiciones similares.

## REFERENCIAS

- Andrews S, Karlen D, Cambardella C. 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal* 68(6):1945-1962.
- Bellamy A. 2013. Banana production systems: Identification of alternative systems for more sustainable production. *Ambio* 42(3):334-343.
- Bünemann E, Bongiorno G, Bai Z, Creamer R, De Deyn G, de Goede R, Fleskens L, Geissen V, Kuyper T, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen J, Brussaard L. 2018. Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120: 105-125.
- CORBANA. 2024. Estadísticas de exportación bananera 2023. San José, Costa Rica, Mundo creativo S.A. 72 p.
- Durango W, Uribe L, Henríquez C, Mata R. 2015. Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 39(1):59-68.
- Jaramillo R, Vázquez A. 1990. Manual de procedimientos para la presentación y realización de estudios detallados de suelos y clasificación de tierras para el cultivo del banano. Departamento de Investigaciones, Asociación Bananera Nacional. San José, Costa Rica. 29 p.
- Marion L, Schneider R, Cherubin M, Colares G, Wiesel P, da Costa A, Lobo E. 2022. Development of a soil quality index to evaluate agricultural cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research* 218: 105293.
- Moebius-Clune B, Moebius-Clune D, Gugino B, Idowu O, Schindelbeck R, Ristow A, van Es H, Thies J, Shayler H, McBride M, Wolfe D, Abawi G. 2016. *Comprehensive Assessment of Soil Health—The Cornell Framework Manual*. Cornell University. 134 p.
- Pérez W, Torres Bazurto J. 2020. Carbon-nitrogen ratio in soils with fertilizer applications and nutrient absorption in banana (*Musa spp. cv. Williams*). *Agronomía Colombiana* 38(2):253-26.

- 
- Vaquero R. 2003. Soil physical properties and banana root growth. In International symposium: Banana Root System: towards a better understanding for its productive management. (San José, Costa Rica). Turner W, Rosales F (Eds.). Proceedings. International Network for the Improvement of Banana and Plantain. Montpellier, France. p. 125.
- Vargas-Fernandez JP. 2024. Evaluación de la calidad de suelos de alta y baja productividad en una finca bananera bajo manejo convencional en el Caribe de Costa Rica. Tesis Maestría en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José, Costa Rica.

## Desarrollo de una aplicación móvil para el cálculo de índices de calidad de suelo en banano

José Pablo Vargas Fernández<sup>1\*</sup>, Olger Francisco Vargas Fernandez<sup>2</sup>, Ronald Romero-Calderón<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Agronomía. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. <sup>2</sup>Ingeniero en Ciencias de la Computación e Informática. San José, Costa Rica. <sup>3</sup>Investigador independiente. San José, Costa Rica.

*\*Autor de correspondencia:*  
José Pablo Vargas Fernández  
josepablo.vargasfernandez@uc  
r.ac.cr

*Contribución:*  
Artículo Científico

*Sección:*  
Manejo de suelos y Nutrición  
química y orgánica

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

*Cita:*  
Vargas Fernández JP, Vargas  
Fernandez OF, Romero-  
Calderón R. 2026. Desarrollo  
de una aplicación móvil para el  
cálculo de índices de calidad de  
suelo en banano. *Acorbat  
Revista de Tecnología y  
Ciencia* 3(1): 139  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26139>

### RESUMEN

La sostenibilidad del cultivo de banano depende de la capacidad para mantener altos niveles de productividad sin comprometer las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En los últimos años, el desarrollo de aplicaciones móviles ha facilitado diagnósticos de bajo costo y mayor accesibilidad, aunque la mayoría se ha diseñado fuera del trópico húmedo o para contextos distintos al banano. El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un prototipo de aplicación móvil, de libre acceso, que permita calcular índices de calidad del suelo en sistemas bananeros a partir de un conjunto mínimo de indicadores. El prototipo, denominado Musalud, se desarrolló en colaboración con la Universidad de Costa Rica, empleando el SDK Flutter y el lenguaje de programación Dart. Su diseño se estructuró en tres etapas: (I) selección de 10 indicadores mínimos, definidos por relevancia agronómica y análisis estadísticos; (II) interpretación mediante la metodología de Distribución Normal Acumulativa (CND); y (III) construcción de un índice de calidad del suelo bajo un enfoque aditivo simple. La base de datos incluyó entre 164 y 5800 registros de suelos bananeros de la región Huetar Caribe. Musalud constituye la primera aplicación móvil en Costa Rica enfocada en banano, con capacidad para generar índices en escala 0–100, acompañados de gráficos tipo semáforo, advertencias y recomendaciones de manejo. Su uso representa un avance hacia la digitalización de la gestión agrícola, con potencial de integración a plataformas de monitoreo y estrategias de agricultura climáticamente inteligente.

**Palabras clave:** Digitalización agrícola, Indicadores mínimos, Sostenibilidad productiva

### ABSTRACT

The sustainability of banana cultivation depends on the ability to maintain high levels of productivity without compromising the physical, chemical, and biological properties of the soil. In recent years, the development of mobile applications has facilitated low-cost and more accessible diagnostics, although most have been designed outside the humid tropics or for contexts other than bananas. The objective of this study was to develop a free-access mobile application prototype capable of calculating soil quality indices in banana systems based on a minimum set of indicators. The prototype, named Musalud, was developed in collaboration with the University of Costa Rica, using the Flutter SDK and the Dart programming language. Its design was structured in three stages: (I) selection of ten minimum indicators, defined by agronomic relevance and statistical analyses; (II) interpretation of the indicators through the Cumulative Normal Distribution (CND) methodology; and (III) construction of a soil quality index using a simple additive approach. The database included between 164 and 5800 records from banana soils in the Huetar Caribe region. Musalud constitutes the first mobile app in Costa Rica focused on banana cultivation, with the ability to generate indices on a 0–100 scale, accompanied by traffic light-type charts, warnings, and management recommendations. Its implementation represents a significant step toward the digitalization of agricultural management, with strong potential for integration into monitoring platforms and climate-smart agriculture strategies.

**Keywords:** Agricultural digitalization, Minimal indicator set, Production sustainability



## INTRODUCCIÓN

En el cultivo de banano, la sostenibilidad implica mantener altos niveles de productividad sin comprometer las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Stoorvogel & Segura, 2018). El concepto de calidad del suelo se refiere a su capacidad para sostener la productividad, integrando tanto propiedades inherentes, determinadas por la génesis del suelo, como propiedades dinámicas, influenciadas por procesos biológicos y prácticas de manejo (Bünemann *et al.*, 2018). En este marco, el interés por evaluar la calidad del suelo ha impulsado el desarrollo de aplicaciones móviles (apps) que ofrecen diagnósticos accesibles y de bajo costo para agricultores, técnicos y extensionistas (Fleskens *et al.*, 2017).

En Europa, se ha desarrollado SQAPP (Soil Quality App), que genera un índice de calidad del suelo acompañado de recomendaciones de manejo adaptadas al contexto local. En Estados Unidos, el USDA-ARS implementó LandPKS (Land Potential Knowledge System), una aplicación que solicita información básica del suelo y genera índices de salud del suelo disponibles para productores y técnicos (Fleskens *et al.*, 2017). En América Latina, un esfuerzo pionero en banano fue la iniciativa SIDICASS, concebida como un sistema regional para diagnosticar la calidad de suelos bananeros mediante la integración de indicadores físicos, químicos y biológicos (Rosales *et al.*, 2008). Aunque se consolidó como una herramienta valiosa, su diseño para computadores de escritorio y las limitaciones tecnológicas de la época restringieron su adopción y permanencia en el tiempo.

En Costa Rica y otros países exportadores de banano, si bien existen investigaciones sobre la calidad del suelo en sistemas bananeros (Vargas-Fernández, 2024), tanto el país como la región se mantienen entre las zonas con menor desarrollo en esta línea de estudio (Cherubin *et al.*, 2025). Entre las principales limitantes destacan el desconocimiento del tema y la elevada inversión de tiempo y recursos económicos que requieren estas evaluaciones. Asimismo, las aplicaciones disponibles, desarrolladas hace más de dos décadas para computadores de escritorio o en contextos distintos al trópico húmedo, refuerzan la necesidad de contar con herramientas recientes, accesibles y adaptadas a las condiciones locales de producción. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar un prototipo de aplicación móvil, de libre acceso, que permita calcular índices de calidad del suelo a partir de un conjunto mínimo de indicadores y facilite la toma de decisiones en el manejo del cultivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del prototipo de aplicación móvil Musalud (Universidad de Costa Rica, 2025) se fundamentó en una evaluación de la calidad del suelo organizada en tres etapas: (I) selección de un conjunto mínimo de indicadores, definidos por su relevancia agronómica y mediante análisis multivariados; (II) interpretación de los indicadores mediante la metodología de Distribución Normal Acumulativa (CND) (Moebius-Clune *et al.*, 2016), que empleó ecuaciones no lineales, la media y la desviación estándar de cada variable para asignar puntajes entre 0 y 100; y (III) construcción de un índice de calidad del suelo mediante un enfoque aditivo simple y en base 100.

El conjunto mínimo de indicadores (etapa I) fue seleccionado utilizando una consulta de criterio experto y mediante un PCA con retención de componentes con autovalores  $>1$  y carga factorial  $\geq 0,45$  y utilizando una matriz de correlaciones de Pearson para eliminar redundancias. Para la interpretación (etapa II), se emplearon entre 164 y 5800 registros provenientes del Mapa de Suelos de Costa Rica (Mata *et al.*, 2022) y de la base de datos de la Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte S.A., en ambos casos de suelos bananeros de la región Huetar Caribe (Vargas-Fernández, 2024). El conjunto mínimo de indicadores incorporado en Musalud incluyó: acidez intercambiable (AI), pH, resistencia a la penetración (RSP), carbono orgánico total (COT), carbono de biomasa microbiana (CBM), densidad de R. similis en 100 g de raíz, así como variables biométricas de la planta: biomasa fresca de raíz funcional (RF), circunferencia de planta (CPF), altura de hijo a parición (APF) y número de manos por racimo (MPR) (Vargas-Fernández, 2024).

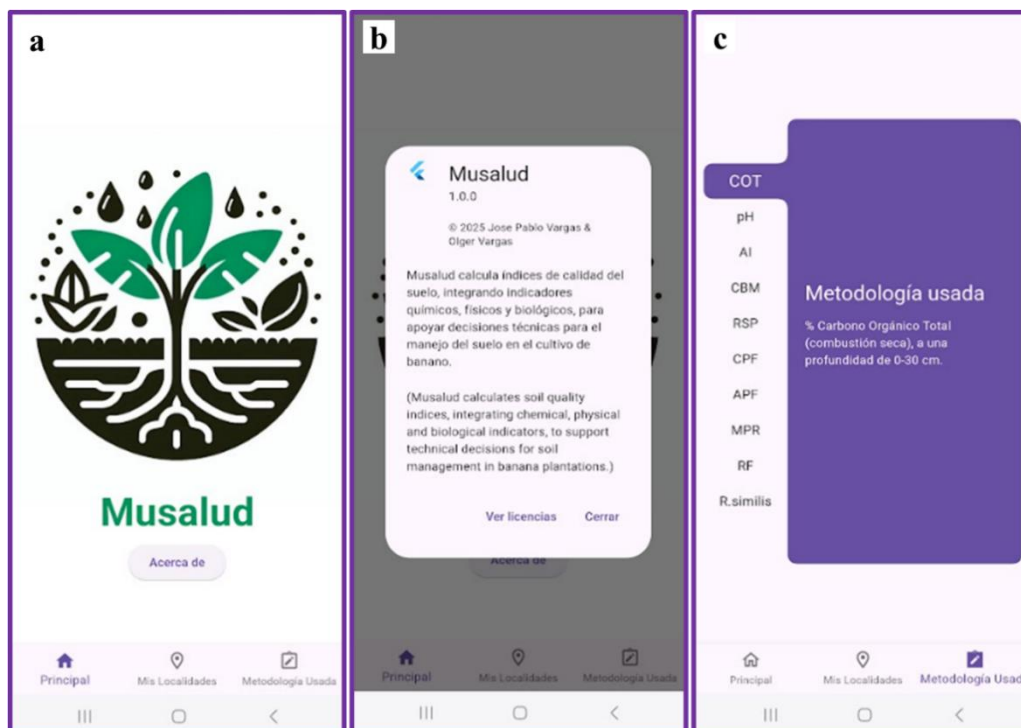
Musalud fue diseñada en idioma español, para sistemas Android, utilizando el SDK Flutter (Software Development Kit) y el lenguaje de programación Dart ([https://play.google.com/store/apps/details?id=com.varferapps.musalud&pcampaign\\_id=web\\_share](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.varferapps.musalud&pcampaign_id=web_share)). El núcleo de su funcionalidad se implementó bajo una arquitectura monolítica y reside en una única clase (*main.dart*). Tanto esta aplicación como las librerías que utiliza son de uso libre y abierto. Entre las librerías de apoyo se encuentran: flutter\_map, utilizada para integrar un mapa interactivo con marcadores de localización; fl\_chart, para generar un gráfico lineal que permite dar trazabilidad a las evaluaciones en el tiempo (hasta 4 meses); y normal, que permite el cálculo de desviaciones estándar, para cada indicador del conjunto mínimo, y la creación del algoritmo base para ejecutar la interpretación de los indicadores (etapa III).

En cuanto a la gestión de datos y privacidad, Musalud es no invasiva: únicamente requiere acceso a Internet y no solicita permisos adicionales. Los resultados de cada evaluación se almacenan temporal y únicamente en la memoria caché, por lo que se

eliminan en caso de desinstalación de la aplicación. Finalmente, esta aplicación fue publicada bajo el logo institucional de la Universidad de Costa Rica en Google Play Store, donde se encuentra disponible de forma gratuita para el usuario.

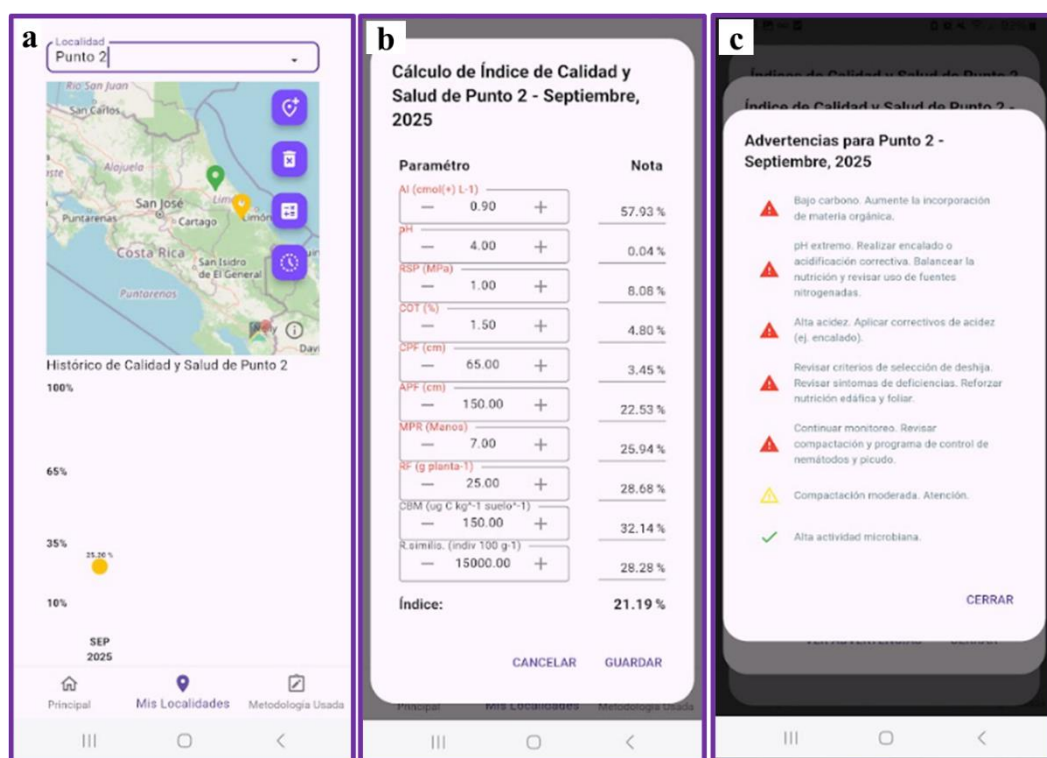
## RESULTADOS Y DISCUSION

El principal resultado de este trabajo fue el desarrollo del prototipo funcional de la aplicación móvil Musalud (Universidad de Costa Rica, 2025), disponible de manera gratuita en la plataforma Google Play (Figura 1a y 1b). Musalud constituye la primera herramienta móvil en Costa Rica diseñada para calcular índices de calidad del suelo en sistemas de producción de banano. La aplicación demostró capacidad para generar un índice de manera ágil, siempre que se cuente con los 10 parámetros que conforman el conjunto mínimo de indicadores requerido, reduciendo así la inversión de tiempo y recursos en comparación con los métodos convencionales. Además, la interfaz incluye una descripción de las metodologías empleadas para determinar cada indicador y orienta al usuario en la solicitud de los análisis correspondientes (Figura 1c).



**Figura 1.** Interfaz del prototipo de la aplicación móvil Musalud. a) Pantalla principal. b) Información general y licencia de uso. c) Visualización de indicadores y metodología empleada para el cálculo del conjunto mínimo de indicadores.

La aplicación permite ingresar manualmente la ubicación del punto de interés en el mapa (Figura 2a), así como los datos de cada indicador, con los cuales se calcula el índice de calidad del suelo en una escala de 0 a 100 (Figura 2b). De forma complementaria, genera un gráfico tipo semáforo que clasifica el índice obtenido en tres categorías (alta, moderada y baja) y facilita llevar un historial por localidad, lo que permite comparar la evolución de la calidad del suelo a lo largo del tiempo (Figura 2a). Finalmente, la aplicación entrega advertencias generales con recomendaciones básicas para cada indicador, de manera que el usuario pueda identificar cuáles requieren atención prioritaria y orientar la implementación de medidas de manejo adecuadas (Figura 2c).



**Figura 2.** Funcionalidad del prototipo de la aplicación móvil Musalud. a) Ingreso de la localidad y grafico tipo semáforo. b) Ingreso manual de datos y cálculo de índice de calidad de suelo. c) Generación de advertencias y recomendaciones de manejo.

Un elemento diferenciador de Musalud es que se construyó a partir de una base de datos amplia y disponible a nivel local que, pese a haber sido depurada, asegura que los resultados estén calibrados a las condiciones edáficas de las zonas de producción bananera del país. No obstante, esta base puede incrementarse y fortalecerse mediante

alianzas con instituciones y la participación de productores, lo que aumentaría la robustez y aplicabilidad del algoritmo para el cálculo del índice de calidad del suelo.

## CONCLUSIONES

Musalud representa un avance en la digitalización y sostenibilidad del manejo del suelo en sistemas bananeros, al ofrecer una herramienta sencilla y de libre acceso que vincula la ciencia aplicada con las necesidades de los productores. Si bien no sustituye los análisis especializados, constituye un complemento valioso para la toma de decisiones en finca y contribuye a democratizar el acceso a información clave sobre la calidad del suelo.

Asimismo, la aplicación se proyecta como un instrumento con alto potencial de integración a plataformas de monitoreo agrícola y a estrategias de agricultura climáticamente inteligente. Futuras versiones deberían contemplar la incorporación de otros idiomas, la posibilidad de operar en modo offline, la actualización del conjunto de indicadores y procesos de validación participativa en distintas regiones, lo que fortalecerá su capacidad para cerrar la brecha entre el conocimiento científico y la práctica productiva.

## REFERENCIAS

- Bünemann E, Bongiorno G, Bai Z, Creamer R, De Deyn G, de Goede R, Fleskens L, Geissen V, Kuyper T, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen J, Brussaard L. 2018. Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120: 105-125.
- Cherubin M, Pinheiro C, Souza L, Canisares L, Ferreira T, Cerri C, Minasny B, Smith P. 2025. Global blind spots in soil health research overlap with environmental vulnerability hotspots. *Communications Earth & Environment* 6, 651.
- Delgado E, Rosales F, Trejos J, Villalobos M, Pocasangre L. 2010. Índice de calidad y salud de suelos para plantaciones bananeras en cuatro países de América Latina y el Caribe. *Bioagro* 22(1): 53–60.
- Fleskens L, Ritsema C, Bai Z, Geissen V, Yang X, Mendes de Jesus J. 2017. Pilot soil quality assessment tool (online). iSQAPER Project. <https://www.isqaper-is.eu/sqapp-the-soil-quality-app/sqapp-concept>
- Mata R, Rosales A, Sandoval D, Vindas E, Alemán B. 2022. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica (en línea). Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas. <http://www.cia.ucr.ac.cr/es/mapa-de-suelos-de-costa-rica>
- Moebius-Clune B, Moebius-Clune D, Gugino B, Idowu O, Schindelbeck R, Ristow A, van Es H, Thies J, Shayler H, McBride M, Wolfe D, Abawi G. 2016. *Comprehensive Assessment of Soil Health—The Cornell Framework Manual*. Cornell University. 134 p.
- Rosales F, Pocasangre L, Trejos J, Serrano E, Peña W. 2008. *Guía de Diagnóstico de la Calidad y Salud de Suelos*. Bioersity International. 80 p.

- 
- Stoorvogel J and Segura R. 2018. Nutrition and soil management in banana cultivation. In Kema G, Drenth A (Eds.), *Achieving sustainable cultivation of bananas*. Burleigh Dodds Science, Cambridge, UK. pp. 1 – 12.
- Universidad de Costa Rica. 2025. MuSalud. Google Play Store. [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.varferapps.musalud&hl=es\\_419](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.varferapps.musalud&hl=es_419) Google Pla
- Vargas-Fernandez JP. 2024. Evaluación de la calidad de suelos de alta y baja productividad en una finca bananera bajo manejo convencional en el Caribe de Costa Rica. Tesis Maestría en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José, Costa Rica.

## Dinámica en la producción de biomasa del plátano por enmiendas de biocarbón, biopolímeros y micorrizas en un suelo Oxisol

Orlando A. González-Rivera<sup>1,2</sup>, José A. Dumas-Rodríguez<sup>2</sup>, Paul Bayman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Puerto Rico – Recinto de Río Piedras, Departamento de Biología, <sup>2</sup>Universidad de Puerto Rico – Recinto de Mayagüez-Estación Experimental Agrícola, Departamento de Ciencias Agroambientales

**\*Autor de correspondencia:**

Orlando A. González-Rivera  
orlando.gonzalez9@upr.edu

**Contribución:**

Artículo Científico

**Sección:**

Manejo de suelos y Nutrición  
química y orgánica

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

González-Rivera OA, Dumas-Rodríguez JA, Bayman P. 2026. Dinámica en la producción de biomasa del plátano por enmiendas de biocarbón, biopolímeros y micorrizas en un suelo Oxisol. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 140  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26140>

### RESUMEN

Las prácticas convencionales de labranza han provocado la degradación del suelo por la pérdida de materia orgánica, acelerando la erosión y reduciendo la fertilidad del suelo. Estas prácticas han afectado significativamente las propiedades biológicas y químicas del suelo, lo que afecta la producción de los cultivos. El plátano es el cultivo hortícola de mayor importancia económica en Puerto Rico. Gran parte de su producción se realiza en suelos Oxisoles, que se caracterizan por su baja fertilidad, acidez y retención de humedad. El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de enmiendas de biocarbón, xantano y micorrizas arbusculares en el desarrollo del plátano y algunos parámetros biogeoquímicos en un suelo meteorizado. El trabajo presenta parámetros hortícolas de altura, raíces y niveles de clorofila y parámetros de calidad de suelos como respiración del suelo y carbono orgánico total (CT). Los tratamientos estudiados fueron control (C), biocarbón y xantano (BX), biocarbón-xantano-micorrizas (BXM) y micorrizas (M). Los resultados demostraron que las enmiendas contribuyeron a mejorar la biología del suelo y la resiliencia agrícola, promoviendo un sistema productivo más sustentable para el plátano en suelos altamente meteorizados.

**Palabras clave:** Rizosfera, Clorofila, Microbiota, Xantano

### ABSTRACT

Conventional tillage practices have led to soil degradation by depleting organic matter, accelerating erosion, and reducing soil fertility. These practices have significantly altered the biological and chemical properties of soil, thereby affecting crop production. Plantain is the most economically important horticultural crop in Puerto Rico. Much of its production occurs in Oxisols, which are known for their low fertility, acidity, and limited moisture retention. This research aimed to examine how amendments of biochar, xanthan, and arbuscular mycorrhizae influence plantain growth and key biogeochemical parameters in weathered soil. The study assessed horticultural factors, including plant height, root biomass, and chlorophyll levels, as well as soil quality indicators such as soil respiration and total organic carbon (TOC). The treatments included control (C), biochar-xanthan (BX), biochar-xanthan-mycorrhizae (BXM), and mycorrhizae (M). Findings showed that these amendments improve soil biology and increase agricultural resilience, with BXM being the most effective amendment for supporting a more sustainable plantain production system in highly weathered soils.

**Keywords:** Rhizosphere, Chlorophyll, Microbiota, Xanthan



## INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos agrícolas constituye uno de los principales desafíos para la sostenibilidad de los sistemas productivos a nivel mundial, sobre todo en las regiones tropicales donde las condiciones climáticas aceleran los procesos de meteorización, lixiviación y pérdida de nutrientes. Las prácticas convencionales del manejo agrícola, como la labranza intensiva, el uso continuo de fertilizantes sintéticos y la escasa incorporación de materia orgánica, han contribuido de manera significativa a la disminución del contenido de carbono orgánico del suelo, al deterioro de su estructura y al aumento de la susceptibilidad a la erosión (Mihelič R *et al.*, 2024). Estos procesos no solo afectan las propiedades físicas y químicas del suelo, sino que alteran profundamente su funcionalidad biológica, comprometiendo la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes esenciales para la productividad agrícola (Almendro-Candel *et al.*, 2018). Lo cual reduce la capacidad del suelo para sostener comunidades microbianas diversas y funcionales, afectando procesos clave como la respiración microbiana, la mineralización de nutrientes y la formación de asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas. En sistemas agrícolas intensivos, esta degradación se traduce en una menor eficiencia en el uso de insumos, una mayor vulnerabilidad a condiciones de estrés abiótico y una reducción de los rendimientos.

En Puerto Rico, el cultivo del plátano (*Musa acuminata* x *Musa balbisiana*) es el cultivo hortícola de mayor importancia económica, social y cultural. Su producción es fundamental para la seguridad alimentaria, la economía rural y la identidad agroalimentaria del país. Una proporción considerable de las áreas dedicadas al cultivo de plátano se establece sobre suelos del orden Oxisol, que se caracterizan por un alto grado de meteorización, elevada acidez y baja y limitada disponibilidad de nutrientes esenciales. Además, estos suelos presentan restricciones físicas relacionadas con la estructura y la retención de humedad, lo que limita el desarrollo radicular y la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes por parte del cultivo. Desde una perspectiva biológica, la degradación de estos suelos se manifiesta en una reducción de la actividad microbiana y de la funcionalidad del suelo. En el cultivo de plátano, cuya productividad depende en gran medida de un sistema radicular eficiente y de interacciones positivas con la microbiota del suelo, estas limitaciones edáficas constituyen un obstáculo significativo para alcanzar sistemas agrícolas sostenibles.

Ante este panorama, el desarrollo y la adopción de estrategias de manejo basadas en enmiendas orgánicas y biológicas han cobrado relevancia como alternativas para restaurar la funcionalidad del suelo y mejorar la sostenibilidad de los agroecosistemas tropicales. El biocarbón, producido mediante la pirólisis de residuos vegetales, ha sido ampliamente estudiado por su capacidad para aumentar el contenido de carbono estable

del suelo, mejorar la retención de agua y nutrientes, y proporcionar microhábitats favorables para los microorganismos del suelo (Yadav *et al.*, 2023). Por otro lado, los biopolímeros orgánicos, como el xantano, poseen propiedades fisicoquímicas que favorecen la agregación del suelo y la retención de humedad, lo cual resulta especialmente relevante en suelos con limitaciones estructurales. El xantano puede actuar como agente estabilizador que favorece la formación de agregados y mejora la disponibilidad de agua para las plantas y los microorganismos del suelo, aumentando la actividad microbiana y facilitando el establecimiento de asociaciones simbióticas beneficiosas. Mientras que las micorrizas arbusculares representan uno de los componentes biológicos más importantes en la interacción suelo-planta, particularmente en sistemas agrícolas tropicales. Estos hongos establecen asociaciones mutualistas con las raíces de las plantas, lo que incrementa la absorción de nutrientes poco móviles y mejora la eficiencia en el uso del agua. Además, las micorrizas arbusculares contribuyen a la estabilidad del suelo mediante la producción de glomalina, una glicoproteína que favorece la agregación del suelo y el secuestro de carbono (Zeng Y *et al.*, 2025).

En cultivos como el plátano, la colonización micorrízica puede mejorar el desarrollo del sistema radicular, el vigor de la planta y su tolerancia a estrés bióticos y abióticos. Nosotros intentamos probar en este estudio la hipótesis de que la integración de biocarbón, biopolímeros orgánicos y micorrizas arbusculares genera efectos sinérgicos que optimizan la dinámica biogeoquímica del suelo y fortalecen la interacción suelo-planta. En esta investigación se presenta el uso combinado de las enmiendas para probar científicamente el efecto de su aplicación en la producción de plátano establecida en oxisoles tropicales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Experimento en invernadero

Se estableció un experimento a nivel de invernadero en el Centro de Investigación Agrícola de la Universidad de Puerto Rico en Río Piedras. La siembra se realizó en un invernadero de ambiente controlado, utilizando tiestos de dos galones y un suelo oxisol de la serie Coto extraído de la Subestación Experimental Agrícola de Isabela. La serie Coto se clasifica como *Typic Hapludox* muy fino, caolinítico, isohipertérmico (Muñoz *et al.*, 2018). El diseño experimental consistió en tres bloques completamente aleatorizados, con cuatro tratamientos y 10 plantas por tratamiento, para un total de 120 plantas de plátano del clon Maricongo. Los cuatro tratamientos fueron los siguientes: Control (C), 5 % Biocarbón + 0.5 % Xantano (BX), 5 % Biocarbón + 0.5 % Xantano + 1.2% Micorriza Arbuscular (BXM) y 1.2 % Micorriza

Arbuscular (M), uniformemente preparados por mezclar los primeros 10 cm del suelo con una emulsión de los tratamientos correspondientes. El material vegetativo de siembra fue de plántulas de cultivo de tejido de plátano Maricongo con una altura aproximada de 17.78 cm. Cada 15 días, se abonó de forma foliar con la formulación 20-20-20 (1 onza/galón) aplicando 12 ml/planta hasta los 65 días.

### **Muestreos suelos, plantas y análisis estadístico**

Los muestreos de suelo se realizaron luego de la siembra de las plántulas de Maricongo a intervalos de 30 días. Las muestras se identificaron según el tiempo de la siguiente manera: primer muestreo (T1), segundo muestreo (T2) y tercer muestreo (T3). Se prepararon muestras compuestas de cuatro tiestos por tratamiento y bloque para realizar las pruebas de respiración del suelo y de carbono orgánico total. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Química Agroambiental de la Estación Experimental de Río Piedras. Se recolectaron las raíces de las plantas al finalizar el experimento para determinar su biomasa y detectar las micorrizas presentes mediante el uso de un microscopio compuesto. Para las medidas morfológicas de las plantas, se realizaron cada 15 días hasta el final del experimento. Se tomaron datos de altura, diámetro y número de hojas. En el caso de los datos de clorofila, se tomaron las medidas de la tercera hoja, de arriba hacia abajo, mediante un SPAD modelo TYS-B. Los datos fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA en el programa R, versión RStudio/2023.12.1, tras verificar la normalidad de los datos.

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los tratamientos de aplicación de biocarbón-Xantano (BX), micorrizas (M) y biocarbón-Xantano (BXM) al suelo Coto produjeron efectos estadísticamente significativos en los indicadores biológicos del suelo y las variables morfológicas en las plantas de plátano Maricongo sembradas en los mismos. El tratamiento BXM incrementó significativamente la respiración microbiana del suelo ( $p = 0.0258$ ), lo que evidencia una mayor actividad metabólica de la microbiota. También se observó una producción de biomasa radical significativamente mayor ( $p = 0.0012$ ), lo que indica una mayor capacidad de absorción de nutrientes por parte de las plantas y se expresó en una mayor generación de biomasa aérea (Figura 1). Adicionalmente, este tratamiento mostró un aumento significativo en el contenido de clorofila foliar ( $p = 0.0142$ ), lo que indica un mejor estado nutricional y una mayor eficiencia fotosintética. De manera particularmente destacada, la altura de las plantas mostró un incremento altamente significativo ( $p = 9.22 \times 10^{-16}$ ), lo que refleja una respuesta marcada del tratamiento en el crecimiento y vigor vegetal.

En conjunto, estos resultados demuestran que el tratamiento BXM fortalece las interacciones suelo–planta–microorganismos en sistemas establecidos sobre oxisoles altamente meteorizados, característicos de las principales zonas productoras de plátano en Puerto Rico. La mejora simultánea de la actividad biológica del suelo y del desempeño vegetativo del cultivo respalda el potencial de esta práctica como alternativa agronómica sostenible para incrementar la productividad y la estabilidad del sistema en condiciones tropicales.

La Figura 1 muestra los efectos de los tratamientos en el desarrollo foliar del Maricongo tras 65 días de la siembra. Se puede observar el efecto positivo que tuvieron los tratamientos BX, M y BXM en el desarrollo foliar de las plantas, y que el tratamiento con mayor vigor fue BXM, en comparación con el resto, debido al efecto compuesto del biocarbón en la estructura del suelo, del xantano en la retención de humedad y de las micorrizas en el desarrollo de las raíces. Los efectos de los tratamientos en los parámetros hortícolas y del suelo a los 0, 30 y 65 días (T1, T2 y T3, respectivamente) se presentan en la Tabla 1, donde se observan diferencias significativas que confirman el efecto positivo de los tratamientos.



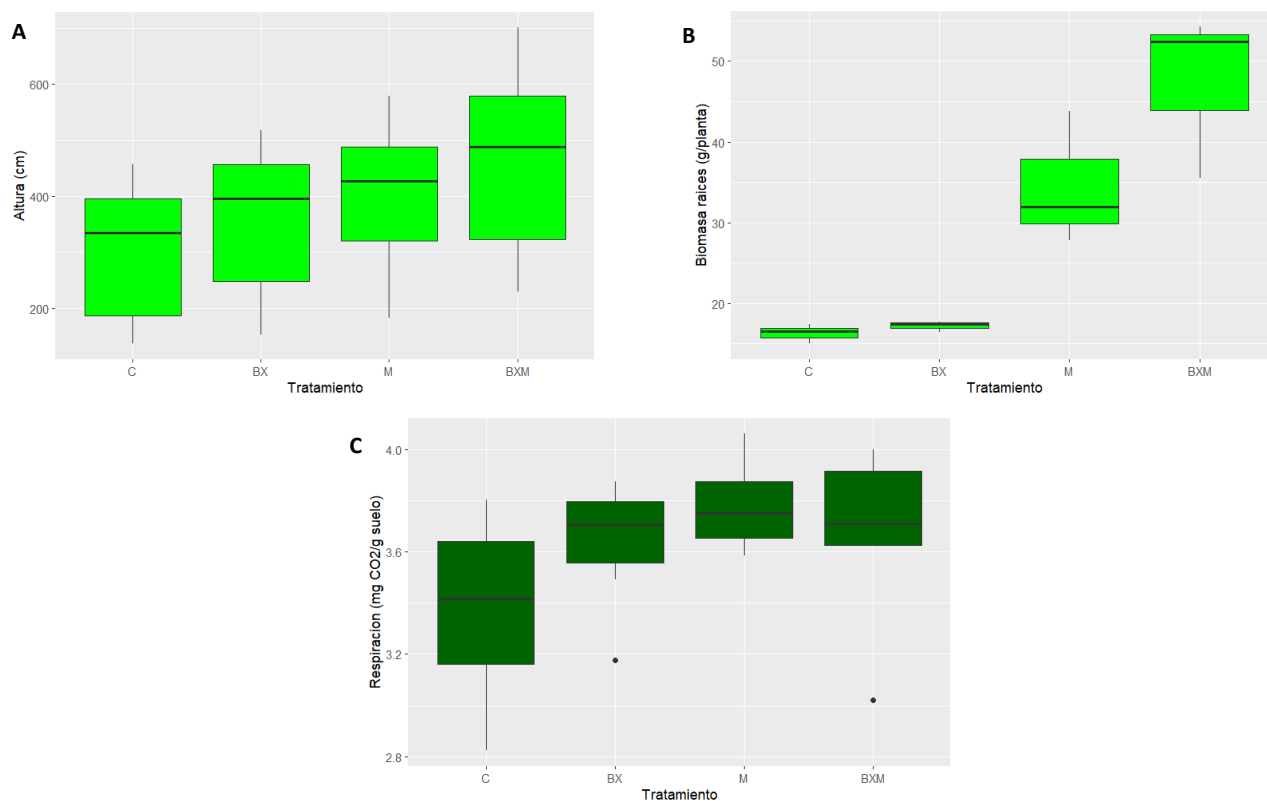
**Figura 1.** Plantas de plátano Maricongo con las diferentes enmiendas de tratamientos.

**Table 1.** Parámetros biológicos del suelo y respuestas morfológicas del plátano Maricongo a los tratamientos: control (C), biocarbón y xantano (BX), biocarbón-xantano-micorrizas (BXM) y micorrizas (M), en tres tiempos (T1, T2 y T3).

Parámetros	C			BX			M			BXM		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Respiración Microbiana (mgCO <sub>2</sub> /gsuelo)*	3.02	3.46	3.73	3.81	3.41	3.71	3.63	3.88	3.83	3.59	3.66	3.83
Carbono Total (mg/kg)	134.65	135.08	127.62	153.93	126.72	122.80	145.33	132.27	128.50	147.89	128.35	119.20
Biomasa de raíces (g)*	-	-	16.33	-	-	17.20	-	-	34.47	-	-	47.38
Clorofila (SPAD)*	-	-	50.27	-	-	49.04	-	-	46.17	-	-	51.00
Altura (m)*	1.82	3.31	4.00	2.34	3.94	4.73	2.81	4.30	5.16	3.01	4.87	6.00

\* p < 0.05

Los efectos de los tratamientos en la altura de la planta (Figuras 1 y 2), la biomasa de raíces (Figura 3) y la respiración microbiana (Tabla 1) demuestran que el tratamiento en BXM presentó valores superiores en estos parámetros.



**Figura 2.** Respuestas morfológicas en altura (A), biomasa de raíces (B) y respiración microbiana (C) del plátano Maricongo a los tratamientos control (C), biocarbón y xantano (BX), biocarbón-xantano-micorrizas (BXM) y micorrizas (M) en tres tiempos.

Igualmente, los efectos de los tratamientos en la altura de la planta, la biomasa de raíces, que muestra el efecto de los tratamientos, especialmente el efecto beneficioso de las micorrizas (Figura 4), y la clorofila demuestran que el tratamiento en BXM presentó valores superiores en la mayoría de los casos.



**Figura 3.** Efectos de los tratamientos en el desarrollo radicular de Maricongo, donde se observa un mayor desarrollo radicular del tratamiento BXM, por el efecto simbiótico de las micorrizas.



**Figura 4.** Micorriza arbuscular (*Glomus intraradices*) colonizando la raíz del plátano Maricongo en el tratamiento BXM.

## CONCLUSIONES

La aplicación de enmiendas orgánicas y biológicas al suelo Coto mejoró significativamente los indicadores de calidad biológica del suelo y tuvo efectos

significativos en el desarrollo de la biomasa aérea y subterránea del cultivo de plátano Maricongo. En términos generales, los tratamientos que incorporaron biocarbón-xantano, micorrizas arbusculares y la combinación de biocarbón-xantano-micorrizas mostraron valores superiores al del tratamiento control.

El tratamiento que integró biocarbón, xantano y micorrizas arbusculares (BXM) presentó el mayor incremento en los parámetros hortícolas asociados al crecimiento y al vigor vegetal. Las plantas sometidas a este tratamiento exhibieron mayor altura, mayor desarrollo del sistema radicular y valores superiores de contenido de clorofila foliar en comparación con los demás tratamientos. Estos resultados indican una mejora del estado nutricional y de la capacidad fotosintética del cultivo bajo la aplicación combinada de enmiendas.

En cuanto a los indicadores de calidad biológica del suelo, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento BXM mostró un aumento de la respiración microbiana del suelo, lo que sugiere una mayor actividad metabólica de la comunidad microbiana en la rizosfera. De manera consistente, el contenido de carbono orgánico total fue superior en los suelos tratados con la combinación de biocarbón, xantano y micorrizas arbusculares que en el control y en los tratamientos individuales.

En conjunto, los resultados evidencian que la integración de biocarbón, xantano y micorrizas arbusculares contribuye a mejorar las condiciones edáficas y el desarrollo del cultivo de plátano en suelos altamente meteorizados, lo que se refleja en un sistema radicular más robusto y una mayor actividad biológica del suelo.

## REFERENCIAS

- Almendro-Candel MB, Lucas IG, Navarro-Pedreño J and Zorpas AA. 2018. Physical properties of soils affected by the use of agricultural waste. In *Agricultural waste and residues*. IntechOpen.
- Mihelič R, Pintarič S, Eler K and Suhadolc M. 2024. Effects of transitioning from conventional to organic farming on soil organic carbon and microbial community: a comparison of long-term non-inversion minimum tillage and conventional tillage. *Biology and Fertility of Soils*, 60(3), 341-355.
- Muñoz MA, Lugo WI, Santiago C, Matos M, Rios S and Lugo J. 2018. Taxonomic classification of the soils of Puerto Rico, 2017. In *Bulletin 313* (pp. 14–26). San Juan: Agricultural Experimental Station.
- Yadav SPS, Bhandari S, Bhatta D, Poudel A, Bhattarai S, Yadav, *et al.* 2023. Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100498.
- Zeng Y, Wang Y, Wang X, Jing X, Shu X, Ren P, *et al.* 2025. Arbuscular mycorrhizal fungi as core engineers in synthetic microbial communities: Boosting plant growth and soil health for sustainable agriculture. *Journal of Fungi*, 11(11), 769.

## Caracterización histológica de la etapa reproductiva del banano y su relación con desórdenes fisiológicos del racimo

Diego Felipe FERIA Gómez<sup>1\*</sup>, Diego Alejandro Londoño Puerta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Asociación de Bananeros de Colombia – AUGURA, Conjunto residencial Los Almendros, Km 4 Vía Carepa – Apartadó, Carepa (Colombia)

**\*Autor de correspondencia:**

Diego Felipe FERIA Gómez  
dfferiag@unal.edu.co

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Fisiología y Bioquímica

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**  
FERIA GÓMEZ DF y LONDOÑO PUERTA DA. 2026. Caracterización histológica de la etapa reproductiva del banano y su relación con desórdenes fisiológicos del racimo. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 141 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26141>

### RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar histológicamente la etapa reproductiva del banano (*Musa AAA*, clon Williams), comprendida entre la diferenciación meristemática y la floración visible. Se realizó un seguimiento fenológico en 42 plantas bajo condiciones de campo, con muestreos destructivos en tres individuos por cada hoja emitida a partir de la hoja F10. Los resultados indicaron que la diferenciación de la inflorescencia se inició a partir de la hoja 19, mientras que su formación morfológica ocurrió desde la hoja 21, aproximadamente cinco semanas antes de la floración. Durante estas etapas, el meristemo floral se localizó entre el 35 y el 47 % de la altura total del pseudotallo, lo que evidenció un crecimiento acelerado y una elevada demanda fisiológica.

Estos resultados se relacionaron con desórdenes fisiológicos ampliamente documentados en los sistemas productivos, como la mancha de madurez, la cual se asocia con deficiencias en la absorción de calcio durante el estado de formación de la inflorescencia, ocurrido entre 14 y 16 semanas previas a la cosecha. Asimismo, la ocurrencia de estrés durante las etapas críticas de iniciación y diferenciación de la inflorescencia, aproximadamente 20 semanas antes de la cosecha, que se vinculan con un menor tamaño potencial del racimo.

**Palabras clave:** Fenología, Nutrición, Inflorescencia, Meristemo, Fisiopatía

### ABSTRACT

The present study aimed to histologically characterize the reproductive stage of banana (*Musa AAA*, cv. Williams), encompassing the period between meristematic differentiation and visible flowering. Phenological monitoring was conducted on 42 plants under field conditions, with destructive sampling performed on three individuals per emitted leaf, starting from leaf F10. The results indicated that inflorescence differentiation began at leaf 19, whereas its morphological formation occurred from leaf 21, approximately five weeks before flowering. During these stages, the floral meristem was located between 35 and 47% of the total pseudostem height, indicating rapid growth and high physiological demand.

These results were related to physiological disorders widely documented in production systems, such as maturity spotting, which is associated with deficiencies in calcium uptake during the inflorescence formation stage, occurring between 14 and 16 weeks prior to harvest. Likewise, the occurrence of stress during the critical stages of inflorescence initiation and differentiation, approximately 20 weeks before harvest, was associated with a reduced potential bunch size.

**Keywords:** Phenology, Nutrition, Inflorescence, Meristem, Physiopathy



## INTRODUCCIÓN

La fenología del banano (*Musa AAA*), entendida como la descripción de los cambios morfológicos y fisiológicos que ocurren a lo largo del desarrollo de la planta, constituye una herramienta esencial para comprender la dinámica del crecimiento y orientar las prácticas agronómicas. Los eventos fenológicos, desde la emisión de hojas hasta la floración y maduración del racimo, están influenciados por factores climáticos como la temperatura, la radiación solar y la disponibilidad hídrica, así como por el manejo nutricional y sanitario del cultivo (Robinson, 2010; Chaurasia *et al.*, 2017).

A lo largo de la historia, diversos autores han propuesto descripciones y escalas fenológicas para el banano, incluyendo adaptaciones del sistema BBCH (González *et al.*, 2001), que permiten codificar las etapas de desarrollo y estandarizar observaciones entre regiones y variedades (Summerville, 1944; Lassoudière (1978); Meier *et al.*, 2009; Sánchez y Mira, 2013; Fabro-Realin *et al.*, 2022). Estas escalas han sido fundamentales para relacionar las fases del cultivo con unidades térmicas acumuladas y con el rendimiento.

Sin embargo, persisten vacíos en el conocimiento sobre los eventos que ocurren entre la diferenciación meristemática y la floración, dado que son procesos no visibles que se desarrollan en el interior del pseudotallo (Robinson, 2010). La comprensión de esta etapa resulta clave, ya que marca el inicio de la transición del crecimiento vegetativo al reproductivo, un momento determinante para el número y la calidad de los frutos formados (Acosta Martínez *et al.*, 2022).

La caracterización de la etapa reproductiva representa un aporte fundamental para la comprensión de los procesos que determinan la productividad de los racimos. En este estudio, se propone describir las características morfológicas que permitan la identificación de los estados del desarrollo meristemático y de la inflorescencia. De igual manera, se busca analizar las posibles interacciones entre estos estados de la inflorescencia y algunos desordenes fisiológicos conocidos del racimo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un seguimiento fenológico en 42 plantas del clon Williams (*Musa AAA*, subgrupo Cavendish) bajo condiciones de campo. Para establecer un punto de referencia, se identificaron las hojas a partir de la denominada F10, considerada como hoja uno (1). A partir de la hoja 10, se efectuaron muestreos destructivos en tres plantas por cada nueva hoja emitida, hasta alcanzar la floración, lo que al final correspondió aproximadamente a la emisión de 24 hojas.

En cada muestreo se registró la altura de la inflorescencia desde la base del pseudotallo y posteriormente se realizó un corte longitudinal del meristemo. Las muestras fueron sometidas a un proceso de tinción histológica para facilitar la observación microscópica y la caracterización morfológica de las estructuras en desarrollo, con el propósito de determinar los cambios asociados a la transición entre las fases de diferenciación y floración.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las observaciones microscópicas permitieron definir cuatro etapas del desarrollo meristemal y de la inflorescencia con características morfológicas claramente identificables, asociadas principalmente a la transformación estructural del meristemo y a la formación y desarrollo de estructuras florales al interior del pseudotallo (Tabla 1). Estas etapas han sido descritas previamente en estudios anatómicos y fisiológicos del desarrollo floral en *Musa* spp. y otras monocotiledóneas con inflorescencias compuestas (Barker & Steward, 1962; Turner *et al.*, 2007).

**Transición meristemal.** Corresponde al proceso fisiológico y molecular mediante el cual el meristemo vegetativo pierde su identidad vegetativa y adquiere competencia reproductiva, transformándose en un meristemo inflorescente. Desde el punto de vista morfológico, este estado se caracteriza por un cambio en la forma y organización del meristemo, que pasa de una estructura cónica, asociada a la producción de primordios foliares, a un ápice ensanchado y aplanado, previo a la aparición de primordios florales (Barker & Steward, 1962; Turner *et al.*, 2007).

**Iniciación de la inflorescencia.** En este estado, el meristemo inflorescente inicia la producción secuencial de primordios florales a lo largo de su eje. Morfológicamente, se identifica por la aparición de protuberancias laterales que darán origen a las manos florales, dispuestas de acuerdo con el patrón característico de las Musáceas, aunque sin diferenciación visible de órganos florales (Turner *et al.*, 2007).


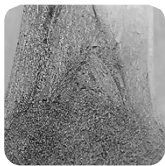


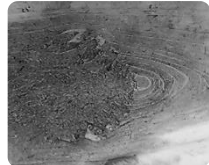


**Diferenciación de la inflorescencia.** Este estado corresponde al proceso de especialización estructural y funcional de los primordios florales, durante el cual se establecen los órganos florales individuales. Morfológicamente, se reconoce por la diferenciación clara de sépalos, pétalos, estambres y gineceo dentro de cada primordio, definiendo la arquitectura floral básica del racimo, aunque sin un crecimiento significativo en tamaño.



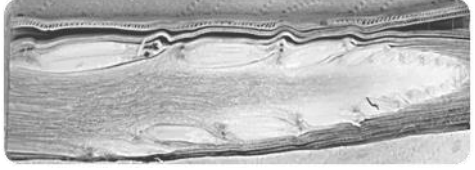
**Formación de la inflorescencia.** También denominada desarrollo floral interno o prefloración, esta etapa comprende el crecimiento y elongación de los órganos florales ya diferenciados, los cuales permanecen completamente contenidos dentro del

pseudotallo. Durante esta fase, el racimo se encuentra morfológicamente completo a nivel interno, aunque aún no es visible externamente, y precede directamente a la emergencia y floración de la inflorescencia (Dumas, 1955; Turner *et al.*, 2007).

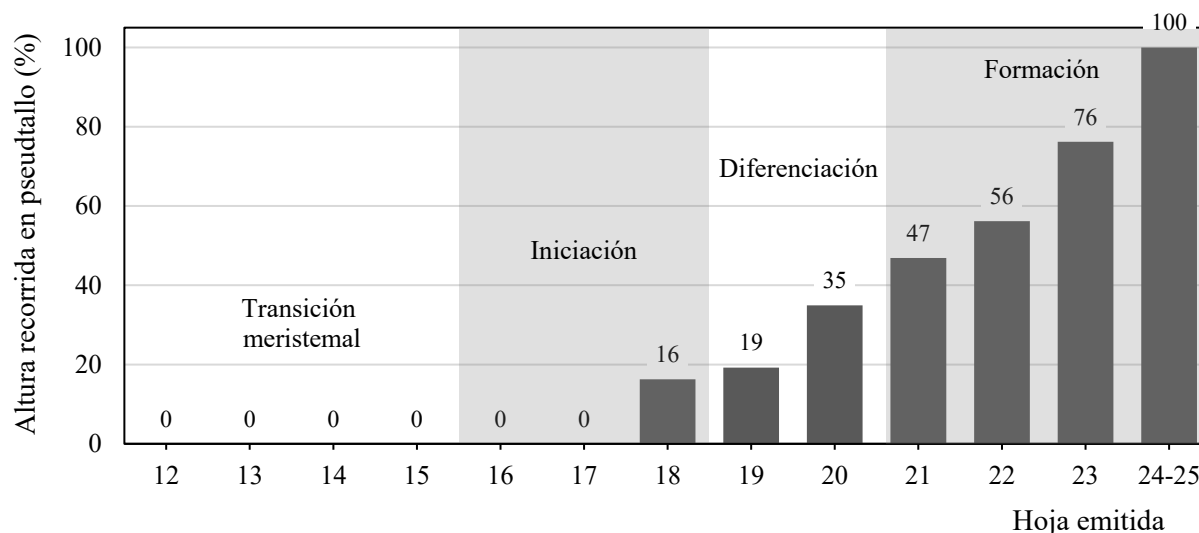
En el presente estudio, se distingue entre diferenciación y formación de la inflorescencia, considerando la diferenciación como el proceso de especialización de los primordios florales y la formación como la fase posterior de crecimiento y desarrollo interno de los órganos florales ya diferenciados, previo a la emergencia del racimo, de acuerdo con descripciones morfoanatómicas previas en banano.

**Tabla 1.** Estados de la inflorescencia durante la etapa reproductiva en función de las hojas emitidas.

Fase de Diferenciación					
Etapa reproductiva	Transición meristemal	Hoja 12 – 15			
	Iniciación de inflorescencia	Hoja 16 – 18			
	Diferenciación de inflorescencia	Hoja 19			
		Hoja 20			
	Formación de inflorescencia	Hoja 21			

		Hoja 22	
		Hoja 23	
		Hoja 24	
<b>Fase de Floración</b>			

Las mediciones de la altura del meristemo indican que su ascenso dentro del pseudotallo comienza entre las hojas 17 y 18, al finalizar la etapa de iniciación de la inflorescencia. La etapa de formación de la inflorescencia se inicia alrededor de la hoja 21, cuando el meristemo se localiza entre el 35 y el 47 % de la altura total del pseudotallo. A partir de este punto, este presenta un desarrollo acelerado hasta alcanzar la floración en la posición máxima del pseudotallo (Figura 1). Este patrón evidencia una alta demanda fisiológica, asociada con una intensificación de la relación fuente-vertedero hacia la inflorescencia, ya que esta pasa de medir pocos milímetros a su tamaño final en un periodo promedio de cinco semanas.



**Figura 1.** Altura recorrida por la inflorescencia en su ascenso por el pseudotallo.

### Desórdenes fisiológicos relacionados

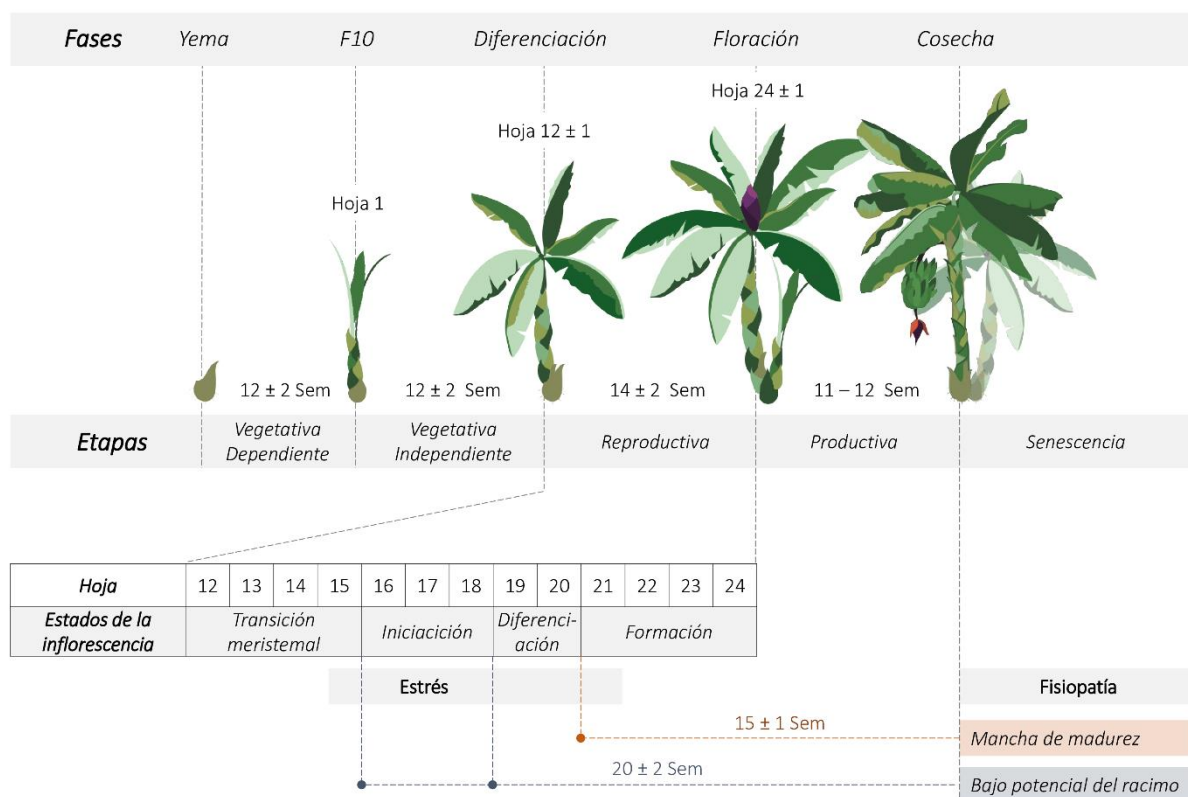
El rápido desarrollo del racimo implica una alta exigencia nutricional, especialmente en elementos de baja movilidad como el calcio. A diferencia de otros nutrientes, el calcio se transporta principalmente por el xilema y su flujo depende del estado hídrico del suelo y de la apertura estomática (Hernández *et al.*, 2020). Por esta razón, el racimo en formación se considera un órgano vulnerable a la deficiencia de este elemento, especialmente en condiciones de estrés hídrico. Tal deficiencia se ha relacionado con desórdenes fisiológicos como la mancha de madurez, caracterizada por la ruptura de paredes celulares en los tejidos del fruto (Cárdenas *et al.*, 2018).

Diversos estudios han reportado una correlación significativa entre la incidencia de mancha de madurez y los déficits hídricos ocurridos entre 14 y 16 semanas previas a la cosecha. Estas observaciones respaldan el fundamento fisiológico del fenómeno, en el que una limitada disponibilidad de agua restringe el transporte de calcio hacia los tejidos en expansión.

Desde el punto de vista fenológico, los resultados obtenidos permiten inferir que los racimos cosechados en una semana determinada iniciaron la fase de formación de inflorescencia entre 14 y 16 semanas previas a la cosecha (Figura 2). Esta secuencia temporal concuerda con el modelo climático propuesto y aporta una explicación biológica robusta para comprender el desarrollo del fruto y la mancha de madurez,

reforzando la utilidad de la caracterización fenológica como herramienta para el manejo fisiológico y nutricional del cultivo.

Los estados de iniciación y diferenciación de la inflorescencia durante la etapa reproductiva se consideran críticos debido a su alta sensibilidad a las condiciones climáticas y a deficiencias nutricionales. Estas interacciones resultan determinantes en la definición del tamaño potencial del racimo (Sánchez y Mira, 2013) y, en particular, en el número de manos y dedos que lo conforman.



**Figura 2.** Estados de la inflorescencia adaptadas a la escala fenológica del cultivo de banano (Feria *et al.*, 2023) y los desórdenes fisiológicos derivadas.

## CONCLUSIONES

La etapa reproductiva del banano presenta una secuencia ordenada de transición meristemática, iniciación, diferenciación y formación de la inflorescencia, las cuales pueden ser caracterizadas histológicamente y asociadas con eventos fenológicos específicos, permitiendo una comprensión precisa del desarrollo interno previo a la floración visible.

El ascenso del meristemo dentro del pseudotallo se inicia entre las hojas 17 y 18 y se intensifica a partir de la hoja 21, cuando comienza la fase de formación de la inflorescencia, localizada entre el 35 y el 47 % de la altura total del pseudotallo, etapa que se caracteriza por un crecimiento acelerado del racimo y una elevada demanda fisiológica asociada al fortalecimiento de la relación fuente–vertedero.

La coincidencia temporal entre la fase de formación de la inflorescencia y los periodos de estrés hídrico y nutricional, ocurridos entre 14 y 20 semanas previas a la cosecha, proporciona una base fenológica y fisiológica sólida para explicar la aparición de desórdenes fisiológicos como la mancha de madurez y la reducción del tamaño potencial del racimo, destacando la utilidad de la caracterización fenológica como herramienta para el manejo agronómico del cultivo

## REFERENCIAS

- Acosta Martínez AM, *et al.* 2022. Estimación alométrica del área foliar y clasificación fenológica en banano. *Revista Científica* 37(2), 45–56.
- Barker WG and Steward FC. 1962. Growth and development of the banana plant. *Annals of Botany* 26, 413–425.
- Cárdenas JA, Vargas A y Flórez C. 2018. Relación entre la nutrición mineral y la incidencia de mancha de madurez en banano (*Musa AAA*). *Revista Agronomía Colombiana* 36(1), 72–81.
- Chaurasia AK, Paliwal R, Singh B and Singh S. 2017. Flowering time in banana (*Musa spp.*), a day-neutral plant: A critical review. *Plant Science Today* 4(4), 147–155.
- Dumas J. 1955. Contribution à l'étude du développement du bananier Nain. *Fruits* 10:301-326.
- Feria DF, Londoño DA, Cardona SP. 2023. Aspectos fenológicos del cultivo de banano. *Cenibanano-AUGURA*.
- Fabro-Realin DMA, *et al.* 2022. Harvest date estimation of Lakatan (*Musa spp.*) based on BBCH and thermal time. *CAB Digital Library*.
- Gonzales R, Ruiz-Silvera C, Buhr L, Bleiholder H, Hack H, Meier U and Wicke H. 2001. Proposal for codification of the phenological cycle of edible Musaceae. *Ann. Appl. Biol.* In preparation.
- Hernández O, Rivas J y Mora M. 2020. Dinámica del calcio en cultivos tropicales: Implicaciones fisiológicas y manejo agronómico. *Agronomía Mesoamericana* 31(3), 501–512.
- Lassoudiere A. 1978. Quelques aspects de la croissance et du développement du bananier Poyo en Côte d'Ivoire. *Fruits* V.33, n.5, p.293-313.
- Meier U, *et al.* 2009. The extended BBCH-scale – A uniform code for phenological growth stages of mono- and dicotyledonous plants. *Julius Kühn-Institut*.
- Robinson JC. 2010. Bananas and plantains. *CAB International*.
- Sánchez J y Mira J. 2013. Principios para la nutrición del cultivo de banano, Colombia: AUGURA. 5p.
- Turner DW, Fortescue JA and Thomas DS. 2007. Environmental physiology of the bananas (*Musa spp.*). *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19, 463–484.

## Efecto de bioestimulantes en la reducción de estrés y aumento del peso de racimos en el cultivo de banano

Anaite Carolina Herrera Ramos<sup>1\*</sup>, Rebeca Madrigal Acuña<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DISAGRO Anillo periférico 17-36 zona 11 Guatemala, <sup>2</sup>Monreri Laboratorio Agrícola 400 m sur oficinas del ICE en San Pedro, sobre radial a Zapote, Costa Rica

\*Autor de correspondencia:  
Anaite Carolina Herrera Ramos  
acherrera@disagro.com

Contribución:  
Artículo Científico

Sección:  
Fisiología y Bioquímica

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

Cita:  
Herrera Ramos AC, Madrigal  
Acuña R. 2026. Efecto de  
bioestimulantes en la reducción  
de estrés y aumento del peso de  
racimos en el cultivo de  
banano. *Acorbat Revista de  
Tecnología y Ciencia* 3(1): 142  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26142>



### RESUMEN

En el cantón de Pococí, provincia de Limón (Costa Rica), se realizó un experimento para evaluar el efecto de la aplicación de bio estimulantes con base en aminoácidos y extractos de algas (*Ascophyllum nodosum*), sobre el peso del racimo en el cultivo de banano (*Musa* spp., cv. Gran Enano). Estos se aplicaron en mezcla con fungicida de contacto multi sitio (mancozeb 62 SC) en dosis de 1 litro por hectárea. El ensayo se llevó a cabo durante dos generaciones, en plantas provenientes de cultivo de meristemos. Las aplicaciones se realizaron cada dos semanas, con un total de 20 aplicaciones en la primera generación y 27 en la segunda. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con tres tratamientos y cuatro repeticiones, cada unidad experimental contó con 30 plantas. Las variables evaluadas incluyeron: 1) parámetros fitosanitarios frente a *Pseudocercospora fijiensis* (agente causal de la Sigatoka negra), 2) crecimiento vegetativo, 3) distancia entre los peciolos (entrenudos) de las hojas #3 y #9, y 4) peso de racimo. Los resultados de las variables distancia entre nudos y peso de racimo mostraron que las plantas en el tratamiento con aminoácidos tuvieron distancia entre nudos, significativamente mayor que la del testigo, evidenciando menor estrés (arrepollamiento). Asimismo, con este tratamiento, se observaron incrementos en el peso del racimo respecto al testigo que oscilaron entre 1.2 y 2.8 kg.

**Palabras clave:** Distancia peciolos, Arrepollamiento, Aminoácidos, Extracto de algas, Peso racimo

### ABSTRACT

In the canton of Pococí, province of Limón (Costa Rica), an experiment was conducted to evaluate the effect of applying biostimulants based on amino acids and seaweed extracts (*Ascophyllum nodosum*) on bunch weight in banana (*Musa* spp., cv. Gran Enano). These were applied in combination with a multisite contact fungicide (mancozeb 62 SC) at a rate of 1 liter per hectare. The trial was carried out over two generations, using plants derived from meristem culture. Applications were made every two weeks, totaling 20 applications in the first generation and 27 in the second. The experimental design used was a randomized complete block design with three treatments and four replications, with each experimental unit consisting of 30 plants. The evaluated variables included: (1) phytosanitary parameters against *Pseudocercospora fijiensis* (the causal agent of black Sigatoka), (2) vegetative growth, (3) distance between the nodes of leaves #3 and #9 as an indicator of leaf bunching (stress), and (4) bunch weight. Results for the variables node distance and bunch weight showed that plants in the amino acid treatment had a significantly greater distance between nodes compared to the control, indicating reduced leaf bunching. Likewise, in this treatment, increases in bunch weight relative to the control were observed, ranging from 1.2 to 2.8 kg.

**Keywords:** Leaf bunching, Seaweed extracts, Amino acids, Bunch weight

## INTRODUCCIÓN

Los bioestimulantes son compuestos o mezclas de compuestos que activan mecanismos fisiológicos en las plantas, con el objetivo de mitigar los efectos negativos del estrés abiótico. Los extractos de algas contienen fitohormonas (citoquininas, auxinas, giberelinas ácido abscísico, brasinoesteroides y precursores de etileno) así como polisacáridos (alginatos) que explican su acción en procesos fisiológicos celulares (Khan *et al.*, 2009). Los aminoácidos son producto de la hidrólisis química o enzimática de las proteínas que modifican el metabolismo del nitrógeno con la consecuente asimilación de carbono y crecimiento de las plantas (Colla *et al.*, 2017).

El cultivo de banano se ve afectado por estrés ambiental (temperatura, sequía, horas luz, exceso de agua etc.) que afecta negativamente el rendimiento de fruta. Uno de los síntomas que se observa en las plantas con estrés es que la distancia entre los peciolos (entrenudos) de las hojas disminuye por aumento de emisión foliar, esto se conoce como “arrepollamiento”.

Con el objetivo de determinar si la aplicación de extractos de algas o aminoácidos mejoran el rendimiento del cultivo de banano (*Musa spp.*, cv. Gran Enano), se instaló un experimento en el cantón de Pococí, provincia Limón, Costa Rica (coordenadas: 10°17'04.90" N; 83°48'21.24" O) desde septiembre 2021 hasta octubre de 2023.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación se realizó sobre plantas Gran Enano provenientes de cultivos de meristemos; las cuales se sembraron en la semana # 39 del 2021. El diseño experimental constó de tres tratamientos (dos bioestimulantes y un testigo) y cuatro repeticiones en un arreglo de bloques completos al azar. Cada unidad experimental estaba integrada por 30 plantas para un total de 120 plantas por tratamiento. Los resultados se analizaron con el programa Minitab® Statistical Software 22 utilizando el modelo lineal general para análisis combinado de múltiples experimentos (Dixon *et al.*, 2018), donde el efecto aleatorio fue la generación y los efectos fijos las repeticiones y los tratamientos. La comparación de medias del peso del racimo se realizó de acuerdo con la prueba de Tukey al 95 % de confianza.

Los bioestimulantes evaluados fueron: AMIN® (composición 11.9 % aminoácidos libres, 0.2 % B, 0.6 % Mn y 1.19 % Zn) y ALGAE® (composición 20 % de extracto *Ascophyllum nodosum*, 2.48 % MgO, 2 % S, 0.33 % B, 0.15 % Cu, 0.33 % Mn, 0.1 % Mo y 1.13 % Zn) ambos de la empresa DISAGRO, en dosis de 1 L ha<sup>-1</sup> mezclados con mancozeb 62 SC en emulsión con Imbirex. La frecuencia de aplicación fue quincenal, siendo 20 aplicaciones en la primera generación y 27 en la segunda.

El programa de control de Sigatoka negra se diseñó de acuerdo con las condiciones climáticas: fungicidas sitio específico y multisitio se alternaron durante el período del ensayo. Los fungicidas se aplicaron con una bomba de motor STIHL 420, en emulsión con Imbirex (1 % vol. aceite) utilizando volúmenes de aceite entre 2.0-7.0 L ha<sup>-1</sup>.

Cada dos semanas se evaluaron, en plantas sin parir las variables: hoja más joven con estría, hoja más joven con mancha, hojas totales y severidad de Sigatoka (utilizando la escala de Stover modificada por Gauhl).

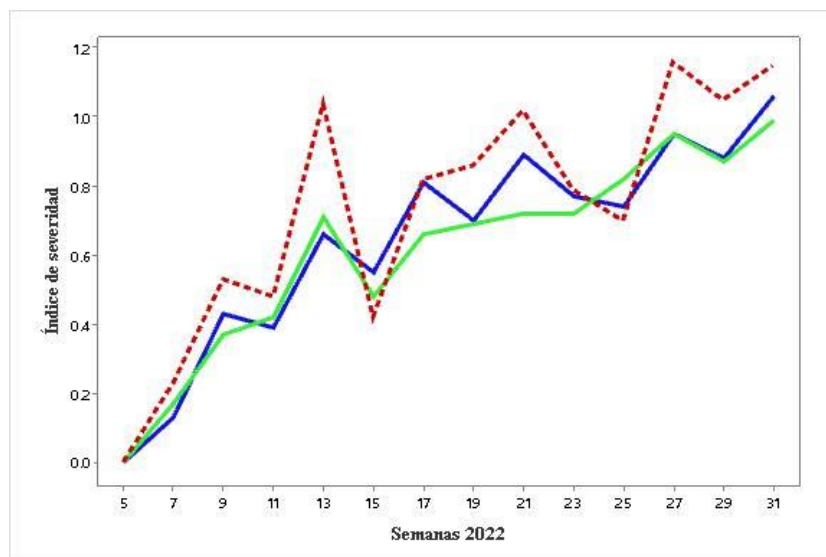
Con la misma frecuencia se evaluaron los parámetros de desarrollo: altura, circunferencia y distancia entre los pecíolos (“entrenudos”). La altura se tomó desde la base del pseudotallo hasta la intersección de las hojas # 1 y # 2. La circunferencia se evaluó a 1.0 m del suelo mientras que la distancia entre los pecíolos se midió entre la hoja # 3 y la hoja # 9, este último refleja el “arrepollamiento”.

Los parámetros de producción evaluados fueron: hojas a parición, hojas a cosecha, peso del racimo (kg), número de manos y calibración de la segunda mano.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

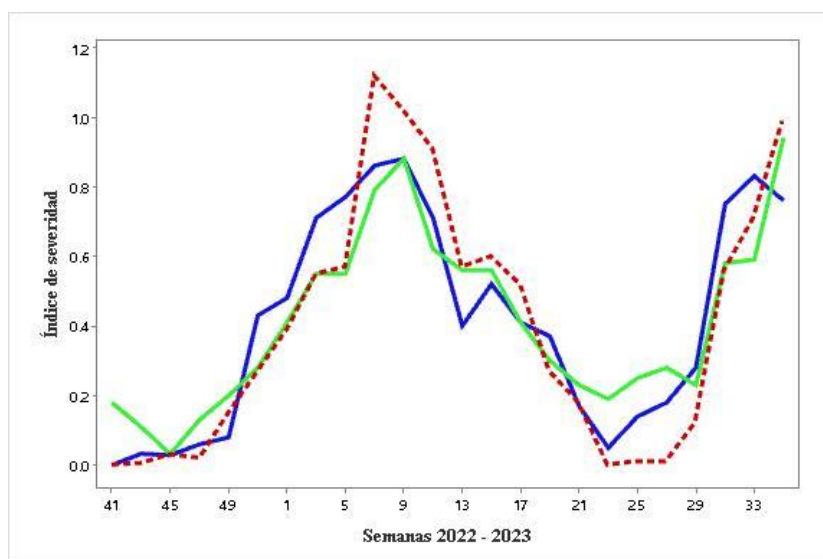
Parámetros fitosanitarios frente a *Pseudocercospora fijiensis*. El control de Sigatoka negra fue estadísticamente equivalente en los tres tratamientos, lo que muestra que la mezcla de los bioestimulantes con el fungicida no tuvo impacto negativo en el control del patógeno. En las figuras 1 y 2 se muestra la severidad de la enfermedad durante la duración del experimento (2022-2023). Las temperaturas durante la duración del experimento oscilaron entre 15 °C y 30 °C, la dinámica de estas se muestra en la Figura 3.

La precipitación pluvial se registró desde la semana 5 de 2022, inicio de las aplicaciones, hasta la semana 34 de 2023, cuando estas concluyeron. La Figura 4 presenta la precipitación acumulada en intervalos quincenales.



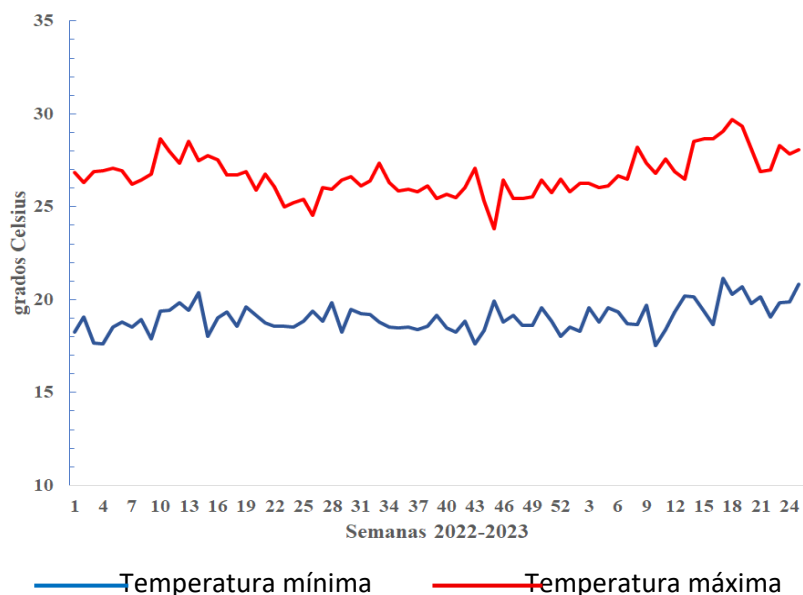
— AMIN®      — ALGAE®      - - - TESTIGO

**Figura 1.** Promedio semanal del índice de severidad de Sigatoka negra en la primera generación. No se encontró diferencia estadística en la severidad de la enfermedad de los distintos tratamientos (valor  $p=0.484$ ).

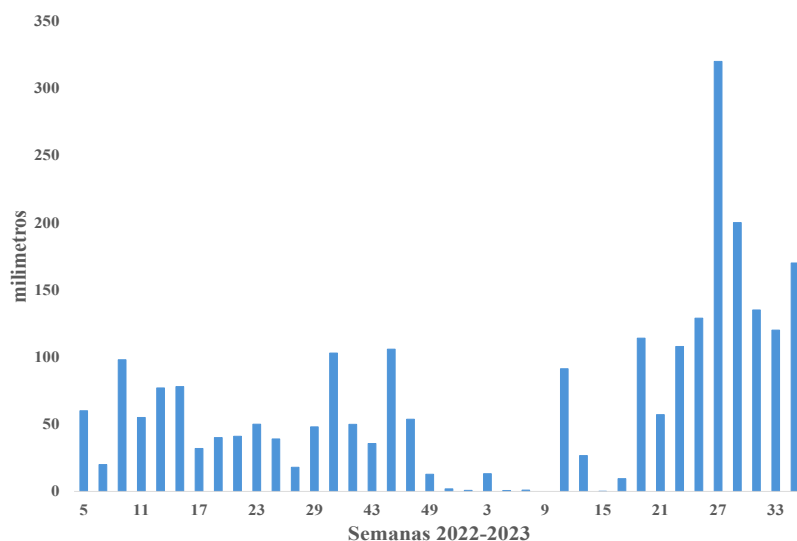


— AMIN®      — ALGAE®      - - - TESTIGO

**Figura 2.** Promedio semanal del índice de severidad de Sigatoka negra en la segunda generación. Similar a la primera generación no se encontró diferencia estadística en la severidad de la enfermedad de los distintos tratamientos (valor  $p = 0.992$ ).



**Figura 3.** Dinámica de temperaturas mínimas y máximas durante toma de parámetros de crecimiento en ambas generaciones.



**Figura 4.** Precipitación acumulada quincenal durante seguimiento de severidad de Sigatoka negra de ambas generaciones (2022 – 2023).

Parámetros de crecimiento de la planta. La altura y circunferencia de las plantas, así como la distancia entre los peciolo de las hojas #3 y #9 se evaluó cada dos semanas en plantas si parir. Los resultados promedio de estos parámetros para la primera y segunda generación se muestran en los cuadros 1 y 2.

**Cuadro 1.** Parámetros crecimiento fase vegetativa de primera generación.

Tratamiento	Altura (cm)	Grosor (cm)	Longitud entre peciolo (cm)
AMIN®	171 b	36.8 b	44.4 b
ALGAE®	166 b	35.6 a	42.5 a
TESTIGO	158 a	34.9 a	41.6 a
	p < 0.05	p < 0.05	p < 0.05

Promedios con la misma letra no son estadísticamente diferentes Tukey (p=0.05)

**Cuadro 2.** Parámetros crecimiento fase vegetativa de segunda generación.

Tratamiento	Altura (cm)	Grosor (cm)	Longitud entre peciolo (cm)
AMIN®	207 b	41.0 b	43.3 b
ALGAE®	200 a	39.6 a	41.9 a
TESTIGO	202 a	39.6 a	41.8 a
	p < 0.05	p < 0.05	p < 0.05

Promedios con la misma letra no son estadísticamente diferentes Tukey (p=0.05)

Las plantas tratadas con AMIN® resultaron con promedios de altura, grosor y longitud entre peciolo mayores que el testigo en ambas generaciones. Menor distancia entre peciolo de las hojas #3 y #9 se interpreta como un síntoma de estrés, este parámetro fue estadísticamente menor en el tratamiento con AMIN®.

Parámetros de producción. Todos los racimos se cosecharon 12 semanas después de la parición. La aplicación de los bioestimulantes no tuvo efecto significativo sobre las variables hojas a parición y hojas a cosecha. Sin embargo, en los parámetros de peso del racimo y número de manos si se observó efecto de la aplicación de estos. En el cuadro 3 se muestran los resultados para ambas generaciones.

**Cuadro 3.** Promedio de pesos y número de manos por racimo por tratamiento en cosechas de la primera y segunda generación.

Tratamiento	Primera generación		Segunda generación	
	Masa (kg)	Manos/racimo	Masa (kg)	Manos/racimo
AMIN®	21.1 b	7.3 b	19.8	7.0 b
ALGAE®	18.9 a	7.0 b	17.9	6.6 a
TESTIGO	18.3 a	6.5 a	18.6	6.5 a
	p = 0.001	p = 0.0028	p = 0.08	p = 0.02

Promedios con la misma letra no son estadísticamente diferentes Tukey (p=0.05)

El modelo estadístico para el análisis combinado del peso de racimo en ambas generaciones utilizado fue:

$$y_{ijk} = \mu + T_i + B_j + (TB)_{ij} + G_k + (TG)_{ik} + \epsilon_{ijk}$$

donde T=tratamiento, B=bloque, G=generación.

En el cuadro 4 se muestran los componentes de la varianza para efectos aleatorios y en el 5 se presenta la prueba de efectos fijos. Los resultados del análisis combinado del peso de racimo y numero de manos en ambas generaciones se resumen en el cuadro 6.

**Cuadro 4.** Análisis de componentes de varianza de efectos aleatorios.

Fuente	Varianza	% del total	Error estándar de la varianza	Z	p
Generación	0	0			
Generación*tratamiento	0.126	0.51	0.336	0.375	0.354
Error	24.83	99.49	1.567	15.84	0.000
<b>Total</b>	<b>24.96</b>				

**Cuadro 5.** Pruebas de efectos fijos.

Término	GL numerador	GL denominador	Valor F	Valor p
Tratamiento	2	3.14	11.89	0.062
Bloque	3	503.3	1.04	0.329

**Cuadro 6.** Resultados combinados de peso promedio y número de manos en ambas generaciones.

Tratamiento	Masa (kg)	Manos/racimo
AMIN®	20.38	7.15 b
ALGAE®	17.99	6.62 a
TESTIGO	18.43	6.49 a
	p = 0.062	p < 0.00

Promedios con la misma letra no son estadísticamente diferentes Tukey (p=0.05)

En la primera generación, con 95 % de confianza estadística, el peso de los racimos de las plantas tratadas con AMIN® fue mayor que el testigo sin aplicación; en la segunda, aunque se observó la misma tendencia, la significancia se redujo al 90 %. Asimismo, el distanciamiento de pecíolos (entrenudos) en las plantas tratadas con AMIN® fue significativamente mayor en comparación con el testigo en ambas generaciones, comportamiento que coincidió con la diferencia de pesos.

El análisis de factores mixtos no detectó diferencias significativas en el peso de racimo entre tratamientos al 95 % de confianza (valor p = 0.062). No obstante, se observó una tendencia a mayores valores, y al considerar un nivel de confianza del 90 %, el tratamiento con AMIN® presentó un mayor peso promedio de racimo respecto al testigo sin bioestimulante.

## CONCLUSIONES

Bajo las condiciones de esta evaluación, con confianza estadística del 95 %, se concluye que la aplicación de bioestimulante AMIN® en la primera generación incrementó el peso de racimos de *Musa* spp., cv. Gran Enano (kg ha<sup>-1</sup>) respecto al testigo.

El análisis combinado del peso de racimo en ambas generaciones indica que, con un nivel de confianza del 90 %, la aplicación de AMIN® incrementó este parámetro en comparación con el testigo sin aplicación.

La aplicación de bioestimulantes AMIN® y ALGAE® mezclados con el fungicida mancozeb 62 SC en emulsión no afectaron el control de Sigatoka negra.

## REFERENCIAS

- Colla G, Hoagland L, Ruzzi M, Cardarelli M, Bonini P, Canaguier R and Rouphael Y. 2017. Biostimulant action of protein hydrosylates: unraveling their effects on plant physiology and microbiome. *Front. Plant Science* 8, 2202.
- Dixon PM, Moore K, van Santen E. 2018. The analysis of combined experiments. In Glaz B, Yeater K (Eds), *Applied Statistics in Agricultural, Biological, and Environmental Sciences*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America 5585 Guilford Road, Madison, WI 53711-5801 USA.
- Khan W, Rayirath UP, Subramanian S, Jithesh MN, Rayorath P, Hodges DM, Critchley AT, Craigie JS, Norrie, J and Prithiviraj B. 2009. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal Plant Growth Regulation* 28(4), 386-99.

## Tecnología en la postcosecha del Banano: más productividad, menos costos

Juan Carlos Mora Ramírez<sup>1</sup>, Ricardo Alexis Peña Guzmán<sup>2</sup>, Francisco Javier Murguialday García de Baquedano<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Consultor independiente, Costa Rica, <sup>2</sup>Departamento de Investigación y Desarrollo, Grupo Expertix, República Dominicana

**\*Autor de correspondencia:**

Francisco Javier Murguialday  
García de Baquedano  
expertixautomatización@gmail  
.com

**Contribución:**

Nota de Investigación

**Sección:**

Postcosecha y Comercialización

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Mora Ramírez JC, Peña  
Guzmán RA, Murguialday  
García de Baquedano FJ. 2026.  
Tecnología en la postcosecha  
del Banano: más productividad,  
menos costos *Acorbat Revista  
de Tecnología y Ciencia* 3(1):  
143  
[https://doi.org/10.62498/ARTC  
.26143](https://doi.org/10.62498/ARTC.26143)

### RESUMEN

El banano es un fruto dulce consumido en todas partes del mundo, con una demanda considerable. Este fruto nos brinda nutrientes importantes, tales como el potasio, magnesio, fibra y más. El sector bananero presenta pérdidas importantes debido a la poca eficiencia de los procesos de postcosecha, lo cual incurre a su vez en menor calidad de fruta y márgenes más reducidos. A través de un método analítico-comparativo, el objetivo de esta investigación es entender cómo la mejora de la postcosecha es beneficiosa, y presentar distintas maneras de lograr esta mejora. Para esto se plantea comparar la inversión en postcosecha vs la inversión en producción, de manera que se ilustre cuál es la opción más ventajosa. Es importante realizar esta investigación para comprender una de las debilidades que afectan al sector bananero, a su vez que se proponen mejoras que la corrijan.

**Palabras clave:** Producción, Pérdidas, Transporte, Agroquímicos, Rentabilidad, Inversión, daños de campo, Análisis de merma

### ABSTRACT

Bananas are a sweet fruit consumed all over the world, with considerable demand. This fruit provides important nutrients such as potassium, magnesium, fiber, and more. The banana sector suffers significant losses due to the low efficiency of post-harvest processes, which in turn results in lower fruit quality and reduced profit margins. Through an analytical-comparative method, this research aims to understand how improving post-harvest processes is beneficial and to present different ways to achieve such improvement. To this end, a comparison between investment in post-harvest processes versus investment in production is proposed, in order to illustrate which option is more advantageous. Conducting this research is important to understand one of the weaknesses affecting the banana sector, while also proposing improvements to address it.

**Keywords:** Production, Losses, Transport, Agrochemicals, Profitability, Investment, Field damage, Loss analysis



## INTRODUCCIÓN

La producción y comercio del banano mantienen una relevancia global sostenida. El comercio mundial se mueve en torno a decenas de millones de toneladas anuales y el fruto sigue siendo uno de los alimentos más consumidos y accesibles en muchos mercados (FAO, 2025). Al mismo tiempo, el sector afronta márgenes apretados, vulnerabilidades fitosanitarias y condiciones climáticas cada vez más erráticas, factores que presionan la rentabilidad de los productores y la estabilidad del suministro internacional.

En este contexto, las pérdidas en la postcosecha continúan siendo un cuello de botella crítico, incluyendo ineficiencias durante la recolección, manipulado, transporte, almacenamiento y distribución. La literatura especializada y las revisiones técnicas señalan que mejoras en manejo, embalaje, transporte, control del microclima y sistemas de maduración artificial pueden reducir pérdidas y mejorar la trazabilidad y la vida útil.

El objetivo de la presente investigación es explorar cómo la implementación de la tecnología en la postcosecha del banano puede ayudar a corregir las ineficiencias descritas, de manera que se logre un aumento de la productividad y mejoras en la calidad de la fruta.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de la investigación utilizada en el presente proyecto se basa en un método analítico-comparativo. Este método consiste en la búsqueda de diversos artículos y material independientes que tengan planteamientos relevantes para la investigación, para luego realizar un análisis individual de cada uno de estos elementos y posteriormente hacer una comparación de estos planteamientos con el contenido desarrollado en la investigación, a fin de analizar donde recaen las diferencias entre los elementos y así demostrar cuál de estos es más viable.

Siguiendo esta metodología, se planea responder a las siguientes preguntas, siendo estas las que guían esta investigación:

P1: ¿Cómo se comparan las mejoras en producción con las mejoras en postcosecha?

P2: ¿Cómo se puede aumentar la eficiencia de la postcosecha del banano?

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Parte A. Producción vs Postcosecha

La toma de decisiones en el sector bananero no se basa solo en percepciones técnicas, sino en impactos económicos medibles. Es necesario realizar una comparativa de la inversión en producción vs postcosecha, dado que esto permite visualizar de forma clara cómo una misma cantidad de capital puede generar resultados muy distintos según el punto de la cadena productiva en el que se invierta.

El banano se considera una fruta altamente perecedera, la cual pierde calidad rápidamente si no se tiene un proceso de postcosecha adecuado. Los mayores factores involucrados en este deterioro son el almacenamiento a altas temperaturas y la presencia de humedad, siendo estos causantes de un 25 a un 40 % del volumen de fruta perdido (Al-Dairi *et al.*, 2023).

A modo de ejemplo se propone el siguiente caso; un productor, que actualmente posee una finca de banano de unas 200 hectáreas, desea invertir, y debe tomar la decisión entre:

- Opción 1 – Modernizar la postcosecha de su finca actual.
- Opción 2 – Comprar y adecuar una finca adicional, sin modernizar la postcosecha existente\*.

En la Tabla 1 se muestran datos relevantes.

**Tabla 1.** Datos iniciales del caso comparativo.

Parámetro	Finca actual	Finca nueva
Producción anual	510,000 cajas	510,000 cajas esperadas
Precio promedio por caja	US\$14	US\$14
Pérdida por postcosecha	30 % sin tecnología**	30%**
Costo de modernización postcosecha	US\$1,200,000	N/A
Rendimiento esperado tras modernización	+15 % producto vendible	N/A

\*Nota: Para este caso, se contempla la compra de una finca previamente plantada y su adecuación mediante la remoción de plantas, preparación de suelo y replantado. La

productividad se establece a un monto de 2550 cajas por hectárea. Se contempla un precio de caja de US\$14 puesta en puerto de desembarque. Estas cantidades van acorde al mercado actual en Costa Rica, según fuentes internas.

**\*\*Nota:** Estos supuestos son aproximaciones basadas en pérdidas estimadas en el sector bananero por mala postcosecha y beneficios típicos de mejoras tecnológicas (manejo mejorado, refrigeración, empaque, calibración, etc.) (Al-Dairi *et al.*, 2023; LINBLE, 2025)

### **A. Opción 1 – Inversión en postcosecha**

Dado que gran parte de las pérdidas del banano se dan por almacenar la fruta a una temperatura inadecuada, se tomará la cámara frigorífica como tecnología de postcosecha a invertir. Dependiendo del proyecto, se puede incurrir en un costo de materiales e instalación de entre US\$40,000 y US\$80,000 para una cámara pequeña (LINBLE, 2025), siendo esta última la cifra de referencia que tomaremos.

Extrapolando la instalación según la producción anual de la finca, el costo de modernizar la postcosecha sería por tanto de unos US\$1,200,000.

Antes de la modernización:

- Producción anual total: 510,000 cajas
- Pérdidas por postcosecha: 30 % → producto vendible = 357,000 cajas
- Ingreso:  $357,000 \times \text{US}\$14 = \text{US}\$4,998,000$

Después de la modernización:

- Supongamos que la mejor postcosecha + manejo reduce pérdidas a un 15 %, un porcentaje conservador según las pérdidas estimadas por la literatura (Al-Dairi *et al.*, 2023).
- Producto vendible =  $510,000 \times 85 \% = 433,500$  cajas
- Ingreso:  $433,500 \times \text{US}\$14 = \text{US}\$6,069,000$

Con esto se ve un incremento anual de US\$1,071,000 gracias a las mejoras implementadas. Desglosando un aproximado del costo operativo:

- Energía: 1500 US\$/mes = 18,000 US\$/año
- Mantenimiento: 15,000 US\$/año
- Mano de obra: 36,000 US\$/año
- Gastos varios: 2000 US\$/año
- Coste operativo anual total = US\$71,000

Podemos entonces calcular el retorno de la inversión como sigue, siendo el costo la suma de la inversión y el costo operativo anual total:

$$\text{ROI} = \text{Beneficio/costo} \times 100 \% = 1,071,000 / 1,271,000 \times 100 = 84.3 \%$$

Esto significa que se recupera la inversión en poco más de 1 año.

### B. Opción 2 – Comprar finca nueva

Según datos internos, se incurre en un costo de US\$35,000 por hectárea para la compra y puesta en marcha de la nueva finca, además de unos US\$10.8 para la producción por caja. En la Tabla 2 se presenta un desglose del costo operativo:

**Tabla 2.** Desglose del costo operativo.

Insumo	Porcentaje del costo
Material de empaque/Cartón	14.5 %
Costo de las Paletas	3.90 %
Transporte	3.62 %
Caja/Cosecha Variable	12.61 %
Hectárea Variable	35.26 %
Costos Fijos	24.41 %
Costo Contenedor/Aduana/Impuestos	5.70 %
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

Por tanto, el beneficio sería:

- Producción anual total: 510,000 cajas
- Pérdidas por postcosecha: 30 % → producto vendible = 357,000 cajas
- Beneficio: 357,000 × (US\$14- US\$10.8) = US\$1,142,400

Calculando el costo para una finca de 200 hectáreas, se tiene el retorno como sigue:

$$\text{ROI} = \text{Beneficio/costo} \times 100 \% = 1,142,400 / 7,000,000 \times 100 = 16.3 \%$$

Esto significa que la inversión se recupera en poco más de 6 años, sin mejorar la postcosecha. En la Tabla 3 se contrastan los resultados obtenidos.

**Tabla 3.** Comparación de resultados.

Aspecto	Postcosecha modernizada	Finca nueva sin inversión postcosecha
Inversión	US\$1,271,000	US\$7,000,000
Producción vendible anual	433,500	357,000
Ingreso estimado	US\$6,069,000	US\$4,998,000
Incremento en beneficios vs base	US\$1,071,000	US\$1,142,400
Recuperación de la inversión	1.18 años	6.1 años

### Parte B. Soluciones de Postcosecha

Existen una serie de tecnologías aplicables a la postcosecha del banano. Cada una cumple con diferentes funciones en el proceso productivo (agroquímica, transporte, empaque, almacenamiento, etc.), lo cual permite una mejora sistematizada en cada una de las partes de este. A continuación, se presentan las soluciones más utilizadas en la actualidad, en conjunto con sus ventajas.

#### Selladora de banano

Una selladora de banano es un equipo automatizado utilizado para aplicar etiquetas sobre el fruto. El dispositivo detecta el banano haciendo uso de sensores ópticos o sistemas de detección por láser, que detectan cada fruto en la línea del proceso. Una vez identificado el fruto, se activa un sistema neumático que aplica la etiqueta de forma controlada, sin dañar la cáscara. Sus ventajas son: alta precisión en la colocación del sello, independientemente de variaciones en tamaño u orientación del fruto; reducción del contacto manual, disminuyendo riesgos de contaminación y golpes; mayor velocidad y consistencia frente al etiquetado manual; mejor trazabilidad, ya que permite incorporar códigos, marcas o información de origen directamente en la fruta y menor desperdicio de etiquetas, gracias a la detección exacta del fruto antes de la aplicación.

#### Cámaras de fumigación

Una cámara de fumigación es una habitación cerrada y controlada, la cual está diseñada para aplicar uniformemente productos fitosanitarios. Estos productos pueden

tener diferentes funciones, tales como control de plagas, eliminación de patógenos. Funcionan controlando diferentes parámetros, tales como tiempo de aplicación, concentración de producto y ventilación, garantizando la calidad del fruto. Sus ventajas son: control efectivo de plagas, mayor uniformidad del tratamiento frente a aplicaciones abiertas, reducción del rechazo en destino por presencia de insectos y facilita el cumplimiento de protocolos de exportación.

### **Máquina armadora de cajas**

Una máquina de armado de cajas es un equipo automático o semiautomático que pliega y ensambla las cajas de cartón utilizadas para el empaque del banano. Sus ventajas son: incremento de la productividad del área de empaque, reducción la dependencia de mano de obra intensiva, mejor la uniformidad y resistencia de las cajas, y disminución de errores y reprocesos.

### **Romanas/Balanzas electrónicas**

Las romanas o balanzas electrónicas son dispositivos de medición que se usan para pesar el fruto. Pueden ser utilizadas para pesar todo el racimo, manos individuales o cajas ya empacadas, asegurando que se cumplan los estándares de la finca. Estos equipos, al utilizarse en conjunto con softwares de digitalización automatizados, permiten registrar pesos en tiempo real y reducir desviaciones. Esto garantiza precisión y trazabilidad en el proceso empacado. Sus ventajas incluyen: aseguramiento de cumplimiento del peso normativo por caja, reducción pérdidas por sobrepeso o bajo peso, facilitan el control de producción y trazabilidad, y mejoran la transparencia comercial.

### **Aplicadores de agroquímicos**

Los aplicadores de agroquímicos son sistemas que aplican de manera controlada fungicidas, bactericidas o recubrimientos sobre el banano durante la postcosecha. Existen diferentes métodos de aplicación, como lo son la aspersion, la inmersión o la dosificación automatizada. Entre sus ventajas se tiene (según el producto aplicado): reducción el consumo excesivo de agroquímicos, mayor uniformidad del tratamiento y aumento de la vida útil del fruto.

### **Robot de llenado de cajas**

Un robot de llenado de cajas es una máquina automática que coloca las manos de banano dentro de las cajas de empaque, siguiendo patrones de acomodo predefinidos. Se trata de un sistema de sensores y actuadores programables que manipula el fruto con cuidado, reduciendo golpes y garantizando una distribución adecuada de la fruta. Sus ventajas incluyen: reducción de daños mecánicos al fruto, aumento de la velocidad y

consistencia del llenado, disminución de la fatiga y errores humanos, y permite mayor estandarización del empaque.

### **Robot de flejado de cajas**

Un robot de flejado de cajas es una máquina automática que aplica flejes alrededor de las cajas de banano, garantizando que estén debidamente cerradas durante el transporte. Este dispositivo ajusta automáticamente la tensión del fleje, logrando que la caja quede firme sin deformarla. Tiene como ventajas: mejor la seguridad del embalaje, reducción de daños durante transporte y manipulación, aumento de la velocidad del proceso logístico y disminución costos por cajas colapsadas o producto dañado.

### **Equipos de transporte en campo**

Un equipo de transporte en campo es un vehículo de arrastre que se encarga de transportar frutas, fertilizantes, pesticidas y otros insumos desde el campo hasta la empacadora y viceversa. Comúnmente son sistemas adaptados para uso en el cable vía de la finca, a través del cual mueve la carga que tenga acoplada. Sus ventajas principales son: mayor capacidad de transporte en comparación con el transporte mediante personas o animales, mayor velocidad de transporte, reducción de daños a la fruta durante el transporte y mayor productividad.

## **CONCLUSIONES**

El banano es un fruto de suma relevancia en el mercado, siendo consumada a nivel global por personas de todas las edades. Debido a su importancia para la población mundial, es necesario poder cumplir con la demanda que tiene mediante la aplicación de mejoras en el proceso de producción. Las pérdidas postcosecha, las cuales son del 20 al 40 % del total de pérdidas, suponen una oportunidad de mejora sustancial.

Los resultados ilustran lo beneficioso que es la inversión en la mejora de la postcosecha en comparación con la inversión en el proceso productivo. No solo se tiene un retorno de la inversión a un plazo más corto, sino que también se generan más beneficios brutos. Existen distintas maneras de realizar mejoras en la postcosecha del banano, cada una con diferentes enfoques. En conjunto, estas tecnologías permiten que el banano llegue al mercado en mejores condiciones y reduce las pérdidas postcosecha, eficientizando el trabajo diario en finca. Al mejorar el control del proceso, la trazabilidad y la presentación del producto, el productor también gana confianza frente a compradores y exportadores. Todo esto se traduce en una operación más rentable y en una mayor capacidad para competir en mercados internacionales cada vez más exigentes. Las mejoras en la postcosecha tienen un impacto inmediato, requieren un

---

capital menor y permiten mejorar el precio al ampliar márgenes en un mercado cambiante.

## REFERENCIAS

- Al-Dairi M, Pathare PB, Al-Yahyai R, Jayasuriya H and Al-Attabi Z. 2023. Postharvest quality, technologies, and strategies to reduce losses along the supply chain of banana: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 134, 177–191. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.03.003>
- FAO. 2025, January. Bananas | Markets and Trade | Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities-overview/bananas-tropical-fruits/bananas/en>
- LINBLE. 2025, July. Inversión en cámaras frigoríficas: guía para calcular el retorno de la inversión. <https://www.linble-coldroom.com/es/guia-para-calculer-el-retorno-de-la-inversion-en-camaras-frigorificas/>

## Blockchain, transparencia y creación de valor en cadenas agroalimentarias

Ilán Meléndez Lugo\*

Asociación Blockchain CR, Costa Rica

**\*Autor de correspondencia:**

Ilán Meléndez Lugo  
ilan@delana.io

**Contribución:**

Nota de Investigación

**Sección:**

Poscosecha y Comercialización

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Meléndez Lugo I. 2026.  
Blockchain, transparencia y  
creación de valor en cadenas  
agroalimentarias. *Acorbat  
Revista de Tecnología y  
Ciencia* 3(1): 144  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26144>

### RESUMEN

La transparencia se ha convertido en un atributo competitivo central en cadenas de valor agroalimentarias crecientemente reguladas y expuestas a riesgos reputacionales. En un contexto caracterizado por cadenas productivas fragmentadas y por la proliferación de contenidos digitales falsos o manipulados, surge la necesidad de mecanismos que permitan generar y verificar evidencia confiable sobre el origen, los procesos productivos y los impactos sociales y ambientales. Este artículo presenta una revisión narrativa sobre el uso de blockchain como infraestructuras de confianza para la trazabilidad, la identidad digital y la coordinación de ecosistemas en agroalimentos. Se analizan: (i) el rol del libro mayor distribuido e inmutable como base técnica de la transparencia, (ii) la construcción de narrativas verificables mediante el registro cronológico de eventos a lo largo de la cadena de valor, (iii) factores críticos de éxito en implementaciones multi-actor y (iv) beneficios observados en acceso a mercados, eficiencia operativa e inclusión financiera. A partir del análisis de experiencias comparables en América Latina, incluyendo iniciativas basadas en credenciales verificables para pequeños productores como AgroWeb3, se analiza que el valor de blockchain no reside en la tecnología por sí misma, sino en su capacidad para alinear incentivos, reducir asimetrías de información y habilitar interoperabilidad entre actores que no requieren confiar entre sí.

**Palabras clave:** Blockchain, Trazabilidad, Cadenas de valor, Transparencia, Credenciales verificables, Web3

### ABSTRACT

Transparency has become a central competitive attribute in agri-food value chains that are increasingly regulated and exposed to reputational risks. In a context characterized by fragmented production systems and the proliferation of false or manipulated digital content, there is a growing need for mechanisms that enable the generation and verification of reliable evidence regarding origin, production processes, and social and environmental impacts. This article presents a narrative review of the use of blockchain as a trust infrastructure for traceability, digital identity, and ecosystem coordination in agri-food systems. The analysis focuses on: (i) the role of immutable distributed ledgers as the technical foundation of transparency, (ii) the construction of verifiable narratives through the chronological recording of events along the value chain, (iii) critical success factors in multi-actor implementations, and (iv) observed benefits related to market access, operational efficiency, and financial inclusion. Based on the analysis of comparable experiences in Latin America, including initiatives built around verifiable credentials for smallholder farmers such as AgroWeb3, the paper argues that blockchain's value does not lie in the technology itself, but in its ability to



align incentives, reduce information asymmetries, and enable interoperability among actors that do not need to trust one another.

**Keywords:** Blockchain, Traceability, Value chains, Transparency, Verifiable credentials, Web3

## INTRODUCCIÓN

Las cadenas de valor contemporáneas operan en un entorno marcado por la globalización, la fragmentación productiva y una creciente presión por parte de consumidores, reguladores e inversionistas para demostrar prácticas responsables. En sectores como el agroalimentario, donde la producción se distribuye entre miles de pequeños y medianos productores y múltiples intermediarios, garantizar información confiable sobre el origen, los procesos productivos y el impacto ambiental y social se ha convertido en un desafío estructural (FAO, 2021).

La transparencia ha sido tradicionalmente abordada mediante sistemas centralizados de información, auditorías periódicas y certificaciones de terceros. Sin embargo, estos mecanismos presentan limitaciones significativas: altos costos, asimetrías de información, dependencia de intermediarios y dificultades para escalar en ecosistemas con múltiples actores. A ello se suma un nuevo contexto tecnológico caracterizado por la proliferación de inteligencia artificial generativa y contenidos falsos, que erosiona la confianza en la información digital.

En este escenario, blockchain surge como una tecnología con potencial transformador. Más allá de su asociación con criptomonedas, blockchain puede entenderse como un libro contable distribuido que permite registrar eventos de manera inalterable y verificable, creando una base común de verdad compartida siendo blockchain una herramienta que contribuye a la transparencia y a la creación de valor en las cadenas productivas, identificando condiciones bajo las cuales esta tecnología puede fortalecer la competitividad y la sostenibilidad (KPMG, 2021).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### **Blockchain y transparencia: fundamentos conceptuales**

Blockchain es una tecnología de registro distribuido en la que múltiples participantes mantienen copias sincronizadas de un mismo historial de transacciones (Tapscott, 2016). Cada registro se agrupa en bloques que se encadenan criptográficamente, lo que impide su modificación retroactiva sin el consenso de la red. Esta característica, conocida como inmutabilidad, constituye la base de su propuesta de valor en términos de confianza.

A diferencia de los sistemas centralizados, donde una entidad controla la base de datos, blockchain distribuye la validación de la información entre los participantes. El consenso reemplaza a la autoridad central, reduciendo el riesgo de manipulación unilateral y aumentando la resiliencia del sistema. Desde una perspectiva de transparencia, esto no implica necesariamente que toda la información sea pública, sino que los registros relevantes puedan ser verificados por las partes autorizadas.

La literatura institucional destaca que la transparencia efectiva no depende únicamente de la disponibilidad de datos, sino de su credibilidad y verificabilidad. En este sentido, blockchain aporta un mecanismo técnico para garantizar la integridad de la información a lo largo del tiempo, lo que resulta especialmente valioso en contextos donde los actores enfrentan problemas de desconfianza estructural.

### **Cadenas de valor y trazabilidad basada en blockchain**

La trazabilidad se define como la capacidad de rastrear un producto o servicio a lo largo de todas las etapas de la cadena de valor, desde el origen hasta el consumidor final (FAO, 2021). En el sector agroindustrial, la trazabilidad es un requisito creciente para acceder a mercados internacionales, cumplir regulaciones ambientales y responder a demandas de consumo responsable.

Blockchain permite de forma cronológica y verificable registrar eventos clave de la cadena de valor, por ejemplo, en los procesos de producción, transformación, transporte, certificaciones. Cada evento puede asociarse a metadatos que aportan contexto y construyen una narrativa productiva: prácticas agrícolas, condiciones laborales, cumplimiento ambiental o historial de calidad.

Experiencias recientes en América Latina muestran que estas narrativas verificables pueden traducirse en valor económico. Productores que demuestran prácticas sostenibles y cumplimiento normativo mediante registros inmutables logran mejores precios, acceso a mercados premium y relaciones comerciales más estables. Asimismo, la trazabilidad basada en blockchain reduce costos de coordinación y auditoría, al disminuir la necesidad de intermediarios para validar información.

### **Transparencia, identidad digital e inclusión productiva**

Un componente clave de las soluciones basadas en blockchain es la identidad digital (Tapscott, 2023). En muchas cadenas agroproductivas, los pequeños productores operan en condiciones de informalidad o anonimato, lo que limita su acceso a servicios financieros, seguros y programas de apoyo. La creación de identidades digitales verificables permite a estos actores construir una reputación basada en su historial productivo.

A través del registro de eventos productivos y comerciales, los productores pueden demostrar comportamiento crediticio, cumplimiento de estándares y estabilidad en el tiempo. Esta información, al ser verificable, reduce la percepción de riesgo para instituciones financieras y abre la puerta a nuevas formas de financiamiento, incluyendo esquemas innovadores como la tokenización de activos productivos.

Desde una perspectiva de desarrollo, la transparencia habilitada por blockchain contribuye a la inclusión productiva al reducir asimetrías de información y democratizar el acceso a oportunidades económicas. Sin embargo, estos beneficios no son automáticos y dependen de un diseño institucional adecuado y de la participación activa de los actores del ecosistema.

## **RESULTADOS**

La evidencia disponible sugiere que blockchain puede generar beneficios significativos en términos de transparencia y creación de valor, pero también presenta limitaciones (KPMG, 2021). Entre los principales beneficios destacan la reducción del fraude, la mejora en la confianza entre actores, el acceso a mercados exigentes y la posibilidad de interoperar con otros sistemas digitales.

No obstante, blockchain no resuelve por sí sola el problema de la veracidad de los datos de origen. Como en cualquier sistema de información, la calidad de la información depende de la calidad de los datos de entrada. La inmutabilidad implica que los errores o falsedades quedan registrados de manera permanente, lo que subraya la importancia de mecanismos de gobernanza, validación y auditoría complementarios.

Además, la adopción de blockchain requiere capacidades técnicas, conectividad y acuerdos institucionales que no siempre están presentes, especialmente en contextos rurales. Por ello, su implementación debe considerarse como parte de una estrategia más amplia de transformación digital y fortalecimiento del ecosistema.

### **Experiencias comparables**

La evidencia empírica más reciente muestra una evolución desde pilotos aislados de trazabilidad hacia ecosistemas interoperables que combinan blockchain, identidad digital y estándares de datos abiertos. Estos casos comparten una lógica común: resolver problemas concretos de coordinación y confianza en cadenas agroalimentarias con múltiples actores, evitando soluciones cerradas y dependientes de un único intermediario.

## **Credenciales verificables para pequeños productores**

AgroWeb3 constituye un ejemplo representativo de esta nueva generación de iniciativas. El enfoque parte de un problema estructural ampliamente documentado en América Latina y el Caribe: la dificultad de los pequeños productores para demostrar atributos productivos, ambientales y sociales de manera portable y verificable. En lugar de concentrarse únicamente en la trazabilidad de un producto específico, Agroweb3 prioriza la identidad digital del productor.

El modelo se apoya en credenciales verificables asociadas a identidades digitales, que permiten a los productores portar información crítica, por ejemplo, pertenencia a cooperativas, certificaciones ambientales, prácticas productivas o historiales de cumplimiento crediticio y compartirla selectivamente con compradores, entidades financieras o programas públicos. Desde el punto de vista de gobernanza, este enfoque reduce la dependencia de plataformas propietarias y refuerza el control del productor sobre sus datos, alineándose con principios Web3 de soberanía de la información (Tapscott, 2023).

Un rasgo distintivo es la interoperabilidad por diseño. En lugar de crear un sistema único, Agroweb3 se concibe como infraestructura habilitante sobre la cual distintos actores pueden ofrecer servicios: trazabilidad de lotes, pagos digitales, seguros paramétricos o financiamiento basado en desempeño. Esta arquitectura permite reducir fricciones entre actores y permite competencia de servicios sobre estándares comunes.

## **Trazabilidad agroalimentaria basada en blockchain**

En paralelo, múltiples experiencias documentadas en el sector agroalimentario se han centrado en trazabilidad de productos con atributos diferenciados, como sostenibilidad ambiental, cero deforestación o comercio responsable. Estas iniciativas suelen combinar registros en blockchain con georreferenciación, documentación digital y, en algunos casos, integración con sensores o sistemas de información agrícola.

La literatura reciente destaca que el beneficio principal no es únicamente rastrear un lote, sino proveer evidencia auditable frente a auditorías, disputas comerciales o crisis reputacionales. Al registrar eventos de manera cronológica e inmutable, las cadenas de valor pueden responder más rápidamente a requerimientos regulatorios y demostrar cumplimiento sin recurrir a procesos manuales costosos (EY, 2020). No obstante, estos casos también evidencian límites claros: sin estándares de datos y acuerdos de gobernanza, los sistemas tienden a fragmentarse y a generar costos de integración elevados.

## CONCLUSIONES

La transparencia se ha convertido en un factor estratégico para la competitividad y sostenibilidad de las cadenas de valor (FAO, 2021). Blockchain ofrece una infraestructura tecnológica capaz de fortalecer la confianza y habilitar nuevas formas de creación de valor basadas en información verificable. En sectores agroindustriales, su aplicación en trazabilidad, identidad digital y financiamiento muestra un alto potencial para mejorar el acceso a mercados, promover la inclusión productiva y responder a demandas regulatorias y sociales.

Sin embargo, blockchain no debe entenderse como una solución aislada, sino como un componente dentro de un ecosistema que incluye gobernanza, estándares, capacitación y colaboración entre actores. Cuando estas condiciones se cumplen, la transparencia deja de ser un requisito impuesto y se transforma en un activo que fortalece la resiliencia y el desarrollo de las cadenas de valor.

## REFERENCIAS

- Brody P. 2023. Ethereum for Business: A Plain-English Guide to the Next Internet of Value.
- Deloitte. 2020. Blockchain: Supply chain innovation. Disponible en: <https://www.deloitte.com/us/en/services/consulting/articles/blockchain-supply-chain-innovation.html>
- EY. 2021. Digital agriculture data solutions. Disponible en: [https://www.ey.com/en\\_gl/insights/digital/digital-agriculture-data-solutions](https://www.ey.com/en_gl/insights/digital/digital-agriculture-data-solutions)
- FAO. s. f. (documento técnico). Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6fa56152-c232-4bc6-8eee-7d413261ad64/content>
- FAO. s. f. (documento técnico). Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/66ce8120-ed1b-4469-a4ca-08529d3b0774/content>
- IDB Lab. 2024. AgroWeb3: A solution to transform smallholder farmers' access to global markets. Disponible en: <https://bidlab.org/en/news/agroweb3-solution-transform-smallholder-farmers-access-global-markets>
- Tapscott D, Tapscott A. 2016. Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World.
- Tapscott A. 2023. Web3: Charting the Internet's Next Economic and Cultural Frontier.
- UNDP. 2021. Blockchain for Agri-Food Traceability. Disponible en: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2021-11/UNDP-Blockchain-for-Agri-Food-Traceability.pdf>
- World Economic Forum. 2024. Blockchain could help transform food supply chains – here's how. Disponible en: <https://www.weforum.org/stories/2024/08/blockchain-food-supply-chain/>

## Panorama mundial de la cadena del banano: evolución del comercio internacional y desafíos estructurales del sector

Carolina Dawson<sup>\*1-2</sup>, Denis Loeillet<sup>1-2</sup>, Annaïg Blouin<sup>1-2</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, UPR GECCO, F-34398 Montpellier, France, <sup>2</sup>GECCO, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

**\*Autor de correspondencia:**

Carolina Dawson  
carolina.dawson@cirad.fr

**Contribución:**

Nota de Investigación

**Sección:**

Poscosecha y Comercialización

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Dawson C, Loeillet D, Blouin A. 2026. Panorama mundial de la cadena del banano: evolución del comercio internacional y desafíos estructurales del sector. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 145  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26145>

### RESUMEN

Desde comienzos de los años 2000, el comercio mundial del banano creció de forma sostenida, impulsado por la expansión de la producción en América Latina y mejoras en productividad, logística y reducción de costos a lo largo de la cadena de valor. Este modelo permitió consolidar al banano como la fruta tropical más consumida y accesible en los principales mercados importadores. Sin embargo, a partir de 2020, esta dinámica comenzó a debilitarse debido a una combinación de factores estructurales y coyunturales, entre ellos disrupciones logísticas, inestabilidad geopolítica, cambio climático, presión fitosanitaria y el aumento de los costos de producción en un contexto de precios persistentemente bajos. Esta ponencia analiza la evolución reciente del comercio mundial del banano durante el período 2020–2025, a partir de datos actualizados sobre volúmenes, precios y tendencias de mercado, con el fin de identificar los principales desafíos y transformaciones que enfrenta actualmente la industria bananera.

**Palabras clave:** Comercio mundial del banano, Exportaciones, Cadena de valor, Sostenibilidad económica, Productividad

### ABSTRACT

Since the early 2000s, global banana trade has grown steadily, driven by production expansion in Latin America and improvements in productivity, logistics, and cost reduction throughout the value chain. This model has consolidated bananas as the most consumed and accessible tropical fruit in major import markets. However, beginning in 2020, this dynamic began to weaken due to a combination of structural and cyclical factors, including logistical disruptions, geopolitical instability, climate change, phytosanitary pressure, and rising production costs in a context of persistently low prices. This paper analyzes recent developments in global banana trade during the period 2020–2025, based on updated data on volumes, prices, and market trends, in order to identify the main challenges and transformations currently facing the banana industry.

**Keywords:** Global banana trade, Exports, Value chain, Economic sustainability, Productivity



## INTRODUCCIÓN

La producción mundial de banano y plátano se estima en alrededor de 140 millones de toneladas anuales (Lescot, 2023), lo que convierte a este cultivo en un pilar tanto de la seguridad alimentaria como del comercio agroalimentario internacional. Si bien la mayor parte de esta producción se destina al consumo local en los países productores, una fracción relativamente limitada —alrededor del 15 %, ya sea 21 millones de toneladas— se destina cada año al comercio internacional. Este comercio se basa casi exclusivamente en una única variedad, el Cavendish, que sustenta una industria de exportación altamente especializada y estratégicamente clave, al contribuir de manera significativa a la generación de divisas, al empleo rural y a la estructuración de cadenas de exportación altamente tecnificadas, particularmente en América Latina, Asia y África.

Aunque el banano es originario del sudeste asiático, la industria bananera de exportación se desarrolló principalmente a partir de finales del siglo XIX en América Latina, región que continúa siendo hoy el principal polo exportador a nivel mundial. El rápido desarrollo de infraestructuras, los avances tecnológicos —en particular en materia de transporte marítimo refrigerado y logística— y las mejoras continuas en productividad permitieron a la industria bananera consolidarse progresivamente como uno de los sectores más dinámicos del comercio agroalimentario mundial (Lassoudière, 2010). Como resultado, el banano ocupa actualmente el primer lugar en el comercio mundial de frutas frescas en términos de volumen.

En los países importadores, el banano se ha consolidado como una de las frutas frescas más consumidas. Su disponibilidad permanente a lo largo del año, su precio relativamente bajo y las estrategias comerciales basadas en promociones y volúmenes elevados han convertido al banano en un producto básico de la canasta alimentaria de los consumidores, especialmente en mercados como la Unión Europea y Estados Unidos. Esta posición central en los hábitos de consumo ha reforzado la presión sobre la cadena de suministro para garantizar precios estables, abastecimiento continuo, con estándares de calidad cada vez más exigentes (Fruitrop, 2017).

Durante varias décadas, tanto la producción como el comercio mundial del banano experimentaron un crecimiento sostenido, apoyado en un modelo intensivo que permitió aumentos significativos de productividad y reducciones de costos a lo largo de la cadena de valor. Sin embargo, en los últimos años han comenzado a manifestarse señales de fragilidad en este modelo, en un contexto marcado por crecientes presiones ambientales, sanitarias, logísticas, geopolíticas y económicas. Estas tensiones plantean interrogantes sobre la sostenibilidad futura de la industria bananera y sobre su

capacidad para mantener las dinámicas de crecimiento observadas hasta finales de la década del 2010. En este contexto, este estudio analiza la evolución reciente del comercio mundial del banano, con el objetivo de identificar los principales factores de cambio y los desafíos estructurales que enfrenta actualmente la cadena bananera global.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El presente estudio se basa en un análisis descriptivo y analítico del comercio mundial del banano, centrado en el período 2010–2025, con el objetivo de identificar las principales dinámicas recientes y los factores que han marcado la evolución del sector en un contexto de crecientes tensiones estructurales. El estudio se apoya en el uso de datos procedentes de fuentes estadísticas internacionales y sectoriales, incluyendo bases de datos de organismos internacionales, estadísticas comerciales y reportes de mercado. El análisis considera principalmente indicadores de producción, exportación e importación, precios internacionales y evolución de los costos a lo largo de la cadena de valor. El enfoque metodológico combina un análisis cuantitativo de las tendencias comerciales con un análisis cualitativo de los principales factores explicativos que afectan al sector bananero. En particular, se examinan los impactos de las disrupciones logísticas, la inestabilidad geopolítica, el cambio climático, la presión fitosanitaria y la crisis de los insumos agrícolas sobre la sostenibilidad económica y productiva de la cadena.

El análisis se realiza desde una perspectiva comparativa, considerando las principales regiones exportadoras —especialmente América Latina y África— y los mercados de destino clave, como la Unión Europea y Estados Unidos. La triangulación de distintas fuentes permite ofrecer una visión sintética de los desafíos y transformaciones que enfrenta actualmente el comercio mundial del banano, reconociendo las limitaciones asociadas a la disponibilidad y homogeneidad de los datos más recientes.

### **Expansión del comercio mundial desde los años 2000**

Desde comienzos de los años 2000 hasta 2020, el comercio mundial del banano Cavendish registró un crecimiento sostenido, con un aumento de las exportaciones de aproximadamente 13 a más de 21 millones de toneladas (Dawson *et al.*, 2025). Este crecimiento estuvo fuertemente concentrado en América Latina, que representa cerca del 70 % de las exportaciones mundiales, impulsado por la expansión de las superficies cultivadas y por importantes mejoras de productividad en países clave como Ecuador y Guatemala, por ejemplo. Nuevas zonas de producción también emergieron en el

sureste asiático (Laos, Cambodia, Vietnam), en respuesta a una demanda regional activa.

En paralelo, la demanda se consolidó en los principales mercados importadores. La Unión Europea, principal mercado importador con 30 % de los volúmenes mundiales, se destacó por su dinamismo, con un aumento significativo de las importaciones y del consumo per cápita. Las importaciones superaron 6 millones de toneladas en 2020 (Eurostat, 2025); Estados Unidos, segundo mercado mundial, mostró un desempeño más estable y se mantuvo durante ese mismo periodo en torno a 4 millones de toneladas. Los mercados asiáticos, mostraron un fuerte crecimiento durante la década del 2010, y el Medio Oriente emergió como un mercado en expansión, aunque marcado por una elevada volatilidad (Dawson *et al.*, 2025).

En conjunto, la expansión simultánea de la oferta y la demanda permitió sostener el crecimiento del comercio mundial del banano durante casi dos décadas.

### **El año 2020: un punto de inflexión**

A partir de 2020, el comercio mundial del banano entró en una fase de estancamiento tras dos décadas de crecimiento sostenido. Los volúmenes comercializados alcanzaron su máximo ese año y, entre 2020 y 2025, se redujeron o se mantuvieron en torno a los 20 millones de toneladas, marcando una ruptura clara con la tendencia expansiva previa. El período de crecimiento continuo parece, por tanto, haber quedado atrás, dando paso a una nueva etapa caracterizada por mayores incertidumbres y limitaciones estructurales.

Este cambio de dinámica se inscribe en un contexto de polícrisis, marcado por una sucesión de choques globales que afectaron simultáneamente a distintos eslabones de la cadena bananera a partir del 2020. En primer lugar, la pandemia de COVID-19, a partir de marzo de 2020, generó importantes perturbaciones en la logística internacional, así como dificultades en la disponibilidad de mano de obra, tanto en las zonas de producción como en los puertos y centros de distribución. Posteriormente, el inicio del conflicto entre Rusia y Ucrania en 2021 provocó un nuevo choque de alcance global, traducándose en una fuerte inflación de los costos, impulsada por el aumento de los precios de la energía, y por consiguiente de algunos insumos agrícolas esenciales. Como consecuencia de ambos choques, la logística internacional se vio afectada de manera duradera por retrasos crónicos, escasez de contenedores y un endurecimiento de los controles e inspecciones, en particular en los principales corredores comerciales que contribuyeron a un aumento significativo de los costos y evidenciaron las fragilidades de una industria que trabaja en flujo tenso.

Estos diversos factores coyunturales tuvieron un impacto significativo en el funcionamiento de la cadena bananera y actuaron como catalizadores de vulnerabilidades estructurales preexistentes.

### **Cambio climático, desafíos sanitarios, y límites del modelo productivo**

Independientemente de los factores exógenos previamente enunciados, a partir de 2020 los niveles de producción se vieron constantemente afectados por una mayor variabilidad climática. Entre septiembre de 2020 y enero de 2023, el fenómeno de La Niña presentó una duración excepcionalmente prolongada, con efectos negativos sobre la productividad en numerosos países de América Latina. Posteriormente, el fenómeno de El Niño se extendió entre mayo de 2023 y abril de 2024. El año 2025 marcó el retorno a condiciones climáticas neutras (CIIFEN, 2025), sin que ello se tradujera en una recuperación inmediata de los rendimientos a nivel mundial.

La incidencia de estos fenómenos se ha intensificado en el contexto del cambio climático, que amplifica tanto su frecuencia como su intensidad. De forma paralela, se observa una mayor recurrencia de eventos climáticos extremos —temperaturas elevadas, sequías, inundaciones y huracanes— en regiones productoras clave como el Caribe y África, afectando negativamente las ratios de conversión y los niveles de productividad. Esta mayor variabilidad climática ha favorecido, además, la proliferación y mayor agresividad de plagas y enfermedades, intensificando la presión fitosanitaria en numerosos países productores. En Costa Rica, por ejemplo, las lluvias intensas y persistentes registradas a lo largo de 2024 ocasionaron pérdidas de producción históricas en 2025, de hasta un 15,3 %, debido a una incidencia récord de la Sigatoka negra (CORBANA, 2025). Estas presiones se ven agravadas por la pérdida de eficacia y las restricciones crecientes en el uso de moléculas químicas tradicionalmente empleadas para el control fitosanitario, motivadas por consideraciones ambientales, regulatorias y de salud laboral. En ausencia de alternativas técnicas de eficacia comparable y disponibles a gran escala, estas limitaciones reducen los márgenes de adaptación del sistema productivo.

A ello se suma la expansión de enfermedades ya presentes. El Moko mostró una incidencia elevada en Ecuador en 2024, afectando superficies significativas de cultivo. Asimismo, el *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Raza 4 Tropical (TR4), detectado por primera vez en Colombia en 2019, se ha extendido progresivamente a Perú (2021), Venezuela (2023) y Ecuador (2025), representando una amenaza estructural para la sostenibilidad productiva de la cadena bananera.

En conjunto, estos factores se han traducido en un estancamiento progresivo de la productividad y en señales claras de un techo productivo en varios países

exportadores. El modelo intensivo que sostuvo el crecimiento del sector durante décadas muestra límites crecientes, caracterizados por una fuerte dependencia de insumos químicos, una eficacia marginal decreciente y restricciones regulatorias cada vez más estrictas. Estos elementos ponen de manifiesto los límites estructurales del sistema productivo y cuestionan su sostenibilidad a medio y largo plazo.

Los límites observados en el plano productivo y sanitario tienen un reflejo inmediato en la dimensión económica, marcada por una presión creciente sobre los costos y los márgenes.

### **Crisis de los costos y sostenibilidad económica del sector**

Tradicionalmente, el banano ha sido la fruta más barata en los supermercados de Europa y Estados Unidos, con precios de importación que descendieron de forma continua hasta alcanzar un mínimo histórico en 2021, situado en 11,4 €/caja en la Unión Europea (Loeillet, 2022).

Este contexto de precios persistentemente bajos coincidió con un fuerte aumento de los costos de producción entre 2020 y 2025. Por un lado, la elevada dependencia de insumos agrícolas expuso al sector a la crisis internacional de los insumos, intensificada tras el inicio del conflicto entre Rusia y Ucrania, que llevó a niveles récord los precios de fertilizantes clave como la urea, el DAP y el cloruro de potasio (World Bank, 2025), así como los costos del cartón, la energía y los fletes marítimos. A ello se sumaron costos crecientes debido a la implementación de medidas de bioseguridad, desde la llegada del Foc-TR4 al continente americano en 2019.

Por otro lado, el costo de la mano de obra aumentó de manera más estructural. Más allá del contexto inflacionario global, la adopción progresiva del Living Wage o salario digno —impulsada por certificaciones y compromisos de los compradores internacionales— ha supuesto la implementación de niveles salariales superiores a los mínimos legales en muchos países productores, con el objetivo de cubrir adecuadamente las necesidades básicas de los trabajadores y sus hogares (Global Living Wage, 2025). Si bien este avance constituye un pilar de la sostenibilidad social del sector, su aplicación en una industria altamente intensiva en mano de obra ha contribuido de forma significativa al aumento de los costos de producción.

En conjunto, el aumento abrupto de los costos a lo largo de la cadena, combinado con pérdidas de rendimiento asociadas a factores climáticos y fitosanitarios, así como con mayores costos logísticos, colocó a los productores en una situación de elevada vulnerabilidad. La persistencia de precios de venta bajos deterioró de forma significativa la rentabilidad, afectando especialmente a los pequeños y medianos

actores y aumentando el riesgo de abandono productivo en diversas regiones. Esta dinámica pone de manifiesto los límites del modelo vigente y plantea interrogantes sobre la sostenibilidad económica del sector a mediano y largo plazo.

### **Panorama reciente 2020-25**

Desde su punto más bajo en 2021, el precio promedio de importación del banano en la UE-27 ha experimentado una revalorización significativa. Entre 2022 y 2025, los precios medios se situaron en torno a 15 €/caja, es decir, aproximadamente 3,6 €/caja por encima del mínimo registrado en 2021. Esta evolución refleja, en parte, el resultado de negociaciones orientadas a integrar el aumento de los costos de producción, así como el impacto generalizado de la inflación en los mercados de consumo de la Unión Europea y Estados Unidos.

No obstante, esta revalorización se produjo en un contexto marcado por una oferta global estructuralmente limitada y por tensiones logísticas persistentes, derivadas de problemas productivos en varios países exportadores clave. La escasez relativa de fruta, combinada con una demanda que se mantuvo resiliente, sostuvo los precios a niveles elevados, particularmente en el mercado spot. En este sentido, la dinámica de 2025 no refleja un reequilibrio estructural de la cadena, sino más bien un mercado sostenido por restricciones de oferta, caracterizado por una mayor volatilidad y fragilidad.

Así, aunque los niveles de precios observados en 2025 representan una ruptura con la tendencia deflacionaria de la década anterior, siguen siendo insuficientes para compensar plenamente el aumento de los costos y reducir la vulnerabilidad económica de una parte significativa de los productores, confirmando la persistencia de desequilibrios estructurales en la cadena bananera y la entrada en una fase de mayor incertidumbre.

### **CONCLUSIONES**

La cadena bananera global, históricamente sustentada en un modelo intensivo de alta productividad, estandarización varietal y bajos costos, enfrenta hoy límites estructurales cada vez más evidentes. La combinación de presiones climáticas, fitosanitarias, regulatorias y económicas ha reducido los márgenes de adaptación del sistema productivo, afectando especialmente a pequeños y medianos productores.

En el mercado europeo, la revalorización reciente de los precios se explica principalmente por restricciones de oferta en un contexto de demanda resiliente, lo que ha incrementado la volatilidad sin resolver los desequilibrios de fondo. En este escenario, garantizar la sostenibilidad futura del sector no podrá basarse únicamente en

ajustes marginales, sino que requerirá una transformación más profunda del modelo productivo y comercial, incluyendo la gestión del riesgo climático y fitosanitario, la diversificación varietal y de mercados, y un reparto más equilibrado del valor a lo largo de la cadena.

## REFERENCIAS

- CIIFEN. 2025. <https://ciifen.org/>. Consulta el 01 de noviembre de 2025.
- CORBANA. 2025. <https://www.corbana.co.cr/noticias/industria-bananera-de-costa-rica-enfrenta-un-ano-marcado-por-afectaciones-climaticas-y-presion-cambiaria/>. Consulta el 12 de diciembre 2025.
- Dawson C, Loeillet D, Lescot T, Sanchez C. 2025. Banana Statistics Yearbook 2024. ODEADOM-CIRAD. France. Retrieved from: <https://www.fruitrop.com/en/media/Publications/Other-publications/Banana-Statistics-Yearbook-2024>
- Eurostat. 2025. <https://ec.europa.eu/eurostat/comext/newxtweb/>. Consulta el 20 de diciembre de 2025.
- Fruitrop. 2017. Focus Banana: the guide to international banana trade. Cirad. Montpellier, France. 272 p.
- Global Living Wage Coalition. 2025. <https://www.globallivingwage.org/>. Consulta el 12 de diciembre 2025.
- Lassoudière A. 2010. L'histoire du bananier. Editions Quae. France. 384 p.
- Lescot T. 2023. World banana production in its diversity and uses. In Fruitrop 287: 100-104.
- Loeillet D. 2022. Banana European market in 2021. In Fruitrop 279: 46-57.
- World Bank. 2025. Pinksheet <http://www.worldbank.org/commodities>. Consulta el 15 de noviembre 2025.

## Marché mondial de la banane: le futur du secteur n'est pas dans une simple adaptation aux changements

Loeillet D<sup>\*1-2</sup>, Dawson D<sup>1-2</sup>, Blouin A<sup>1-2</sup>, Lapeyre L<sup>1-2</sup>, Risede JM<sup>1-2</sup>, Côte FX<sup>1-2</sup>

<sup>1</sup>CIRAD, UPR GECO, F-34398 Montpellier, France, <sup>2</sup>GECO, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

**\*Autor de correspondencia:**

Loeillet Denis  
denis.loeillet@cirad.fr

**Contribución:**

Nota de Investigación

**Sección:**

Poscosecha y Comercialización

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Loeillet D, Dawson D, Blouin A, Lapeyre L, Risede JM, Côte FX. 2026. Marché mondial de la banane: le futur du secteur n'est pas dans une simple adaptation aux changements. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 146  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26146>

### RÉSUMÉ

Les systèmes de production et de commercialisation sont à la croisée des chemins. Les nombreuses crises que le monde économique et agricole traversent sont le révélateur d'un monde en mutation profonde. Reste à savoir si le secteur bananier restera sourd à ces avertissements ou si, pour assurer sa pérennité et regagner de la valeur ajoutée, il prendra le train des transitions.

**Mots clés:** Transition, Agroécologie, Changement, Variété, Système de culture

### RESUMEN

Los sistemas de producción y comercialización se encuentran en una encrucijada. Las numerosas crisis que atraviesan la economía y la agricultura son reveladoras de un mundo en profunda transformación. Queda por ver si el sector bananero seguirá haciendo oídos sordos a estas advertencias o si, para garantizar su sostenibilidad y recuperar valor añadido, se subirá al tren de las transiciones.

**Palabras clave:** Transición, Agroecología, Cambio, Variedad, Sistema de cultivo



## INTRODUCTION

Le temps du monde fini commence », voilà comment Paul Valéry voyait le destin de notre civilisation. Cette pensée se vérifie à chaque instant tant l'actualité regorge d'exemples qui nous font toucher du doigt les différentes limites planétaires. Elle fait aussi parfaitement écho sur ce que pourrait, ou est en train, de devenir la filière mondialisée de la production et de l'exportation de banane dessert. Rien n'est certain bien évidemment mais faits et tendances montrent que nous serions à un point de basculement entre un système bananier basé sur une et une seule variété, la Cavendish, un système de production intensif en intrants (engrais et pesticides) qui produit de fortes externalités négatives tant sociales qu'environnementales. Système qui, notamment en Europe, organise la destruction méthodique et massive de valeur ajoutée. On voit mal dans cette description apocalyptique mais réaliste, où se cachent la durabilité et la résilience du système. Nous sommes ici au cœur de la réflexion.

Et pourtant, c'est le propre et même le quotidien des filières et de ses acteurs que d'adapter leurs pratiques à de nouveaux cadres de contraintes. Pour autant, l'adaptation du secteur semble sinon au point mort du moins largement insuffisant face à des moteurs du changement qui s'allument les uns après les autres, qui se multiplient et s'intriquent jusqu'à mettre en péril le modèle dominant. Ces moteurs, parfois anciens mais qui s'emballent, sont de natures extrêmement diverses : effets du changement climatique, émergence de maladies et ravageurs, augmentation de la résistance de ces maladies et ravageurs aux pesticides, baisse de fertilité des sols, baisse de productivité, effet dévastateur de l'usage des pesticides sur l'environnement et les hommes, embolie logistique, effet désorganisateur d'une pandémie mondiale, augmentation des risques et des incertitudes, émergence d'une conscience sociale et sociétale, etc.

### **Anticiper plutôt que subir**

De natures différentes on l'a dit, d'un effet immédiat ou plus à moyen ou long terme, d'un impact direct ou indirect, cumulatif entre eux, etc., ces moteurs du changement doivent nous faire réfléchir au devenir de notre filière. Ne pas mener cette réflexion, c'est se condamner à subir les ruptures plutôt qu'à les anticiper. Mal le faire, c'est par exemple penser de manière simpliste en faisant des relations de cause à effet, là où il n'y en pas et par la même rater la cible. Dans le domaine de la pensée unique ou plutôt de l'impensé, on peut lire depuis plusieurs mois que le changement climatique semble être l'alpha et l'oméga des problèmes de la filière. La victime expiatoire est toute trouvée. C'est ce que nous avons pu lire par exemple dans les déclarations de grands opérateurs internationaux à la presse spécialisée notamment financière, expliquant uniquement par les effets du changement climatique, la baisse historique

des exportations du Costa Rica en 2025. On va au plus simple comme ce fut toujours le cas. Sauf que les problèmes sont de plus en plus complexes à appréhender dans leurs causes et effets multiples, alors de là à les régler d'un coup de baguette magique... Il est révolu le temps béni par certains et honni pour d'autres, du « à chaque problème correspond une solution phytosanitaire ».

La preuve, dans les pays où c'est la politique de « l'open bar » en termes d'usage de produits phytopharmaceutiques, la maîtrise des dégâts de la cercosporiose noire est loin d'être parfaite. L'émergence en 2019 en Colombie et la diffusion de la fusariose race 4 tropicale ou TR4 (Ritter, 2024) dans le grenier à banane mondial qu'est l'Amérique du Sud est aussi un rappel de l'extrême fragilité de notre filière. Le Pérou en paie le prix fort ne pouvant que constater le désastre. La TR4 y est là-bas hors de contrôle faisant souffrir à l'extrême un secteur clé pour des milliers de petits producteurs (Dawson, 2025). Les Philippines ont longtemps fait illusion dans la maîtrise de la maladie. Mais le masque est en train de dramatiquement tomber. La productivité et les volumes d'exportation sont sur la pente fortement descendante. Les mesures de biosécurité aussi drastiques soient elles ou le déménagement des plantations ne suffisent plus à endiguer le champignon et ses conséquences dévastatrices. Dans cette ambiance de psychose ou même les congrès internationaux spécialisés sur la banane, comme c'est le cas de l'Acorbat, se délocalisent hors zone de production, l'annonce officielle de l'arrivée du champignon dans le sud de l'Equateur en décembre 2025 a un effet traumatique. La vague d'émotion déborde largement les frontières du premier exportateur mondial. Avec une dose certaine d'optimisme et parce qu'il n'y a pas de plan B, on peut espérer que cela ne soit pas le dernier clou dans le cercueil de cette filière mais bien le point de départ d'une réflexion holistique sur son avenir agronomique et commerciale.

### **Changement climatique: de l'ignorance à l'impact**

Revenons sur les effets du changement climatique. Il est, aux yeux des chercheurs, pour l'instant difficile et prématuré d'établir avec certitudes des relations de cause à effet entre changement climatique et dégâts. En effet, il est rare qu'un dégât soit la résultante d'une seule cause. On peut toutefois relever certains constats. La hausse tendancielle des températures moyennes, la disparition progressive des intersaisons, l'augmentation des périodes où la température est élevée, un régime de pluie perturbé, etc. ont des conséquences sur la durée des cycles, le remplissage des doigts, le potentiel de conservation (durée de vie verte), etc. Un exemple frappant est celui des ratios carton / régime qui s'effondrent. On parle par exemple de ration de 0.7 à 0.8 à certaines périodes en République dominicaine. En Guadeloupe et Martinique, les services météo ont relevé une température moyenne en augmentation de 1.5 degrés

Celsius et de plus longues périodes de températures anormalement fortes. C'est aussi le cas en Côte d'Ivoire où, là-bas comme ailleurs, ces périodes dérèglent le fonctionnement du bananier. Le changement climatique va sans surprise reformater la planète bananière (Varma, 2025) mais encore une fois, vouloir tout expliquer au travers du seul prisme du changement climatique empêcherait de penser la complexité et condamnerait le secteur à une plus ou moins lente agonie. Rappelons-le une nouvelle fois, les effets du changement climatique seront de plus en plus forts mais ce n'est qu'un des facteurs de dysfonctionnement de la filière.

### **L'urgence d'un changement parasismique**

Regardons maintenant de près les pratiques de protection des cultures. Certaines filières et opérateurs ne souhaitent, par exemple, ne rien changer à leurs systèmes de culture. L'usage des pesticides y tangente voire dépasse dans certains cas la barre honteusement symbolique des 100 kg de matière active par hectare et par an. Alors même que les plus vertueux ne dépassent pas les 3 kg (Loeillet, 2024). Ne rien faire pour améliorer la situation est le comportement le plus largement répandu. Dans la majorité des cas, le recours à la boîte à pharmacie paraît être aux yeux des opérateurs comme la seule réponse possible. Et c'est une vérité qui vaut dans bien d'autres domaines que le seul usage immodéré, systématique et irréfléchi des produits phytosanitaires. On peut élargir le spectre à beaucoup de pratiques dans les domaines techniques (exemple de la fertilisation) comme sociaux (exemple du droit du travail, du salaire décent, de l'exposition des travailleurs, de la pénibilité du travail, du genre, etc.).

Pourquoi évoluer quand le changement implique une prise de risque quant à l'adoption de pratiques relevant des principes de l'agroécologie (Côte, 2022)? Rappelons en effet qu'un planteur ne produit pas de l'agroécologie. Il produit des bananes, doit atteindre un certain niveau de productivité, programmer son offre, assurer une parfaite qualité commerciale, maîtriser son coût de revient, pallier au manque de main d'œuvre, répondre aux diverses injonctions de ses clients, etc. Rentrer dans une démarche agroécologique a pour effet d'augmenter l'incertitude autour de ces questions. C'est ce que l'on appelle en économie l'aversion au risque. Si elle n'est pas comprise en la documentant ni accompagnée, les changements socio-techniques resteront lettre morte même si les alternatives par exemple en termes de pratiques agricoles sont matures en termes de déploiement. L'exemple le plus éclairant est la maîtrise de la cercosporiose noire du bananier via l'avertissement biologique (lutte raisonnée) en lieu et place de la stratégie de traitement systématique. Les exemples sont, anciens et nombreux, d'une efficacité de l'approche raisonnée et cela dans différents contextes pédo-climatiques : chute drastique de l'usage des fongicides de

synthèses pour une même efficacité biologique, maîtrise de la résistance du champignon aux pesticides, productivité et qualité non dégradées ou encore coût économique identique voire à la baisse. Les bénéfices sociaux sont aussi importants rien qu'avec la réduction des risques d'exposition des travailleurs.

Sauf que c'est un changement que l'on peut qualifier de parasismique du fait d'une réforme totale de l'approche, de la formation des travailleurs et de l'encadrement, de l'organisation du travail (effeuillage chirurgical en complément de l'approche raisonnée), du poids sur le décisionnaire de repousser un traitement, etc. Enfin, et ce n'est pas le moindre des sujets, il faut aussi intégrer à cette stratégie, le fait que le système puisse parfois dériver voire dérailler. La responsabilité de changer de pratiques est donc grande.

### **Création de commun**

Une telle démarche se doit donc d'être accompagnée. La transition ne relève pas de la pensée magique. Comprendre, couvrir les risques, contextualiser et s'inscrire sur une démarche de long terme (trajectoire de transition) sont des préalables si l'on souhaite que les systèmes s'amendent pour perdurer. Couvrir le risque quand le système dérape est un minimum. Mais le chemin ne serait qu'à moitié fait. Car il restera encore à rémunérer la création de bien commun. Il faudrait enfin reconnaître qu'une banane issue d'un système agro-écologique, produite en respectant l'environnement, les travailleurs et les populations riveraines, est très différente par nature d'une banane issue de systèmes conventionnels. Appliqué le principe des communs (de l'anglais *commons*, notion remise sur le devant de la scène en 2009 par les travaux de la prix Nobel d'économie, Elinor Ostrom) à la production et au commerce de la banane n'est ni plus ni moins avoir « une capacité d'action inédite, orientée vers la prise en charge collective de multiples biens ou de services » (Jourdain, 2021).

Encore faut-il caractériser l'impact des changements de pratiques sur les attributs du produit banane. L'agro-écologie est une approche sur laquelle on a du mal à communiquer. Au moindre verdissement des chaînes de valeurs, on se réfère à cette notion. La notion de degré de transformation des systèmes est pourtant centrale dans la définition d'une agro-écologie dites « forte » et qui repose sur des principes fondés non seulement sur la gestion des processus écologiques pour produire des services environnementaux mais aussi sur des dimensions sociales (Baret, 2017). Objectiver les impacts issus de cette transformation est un préalable à la reconnaissance en termes de valorisation des produits labellisés agro-écologique. Et le travail est immense, car les impacts sont légions : sur les coûts, sur le besoin de main d'œuvre, sur la pénibilité au travail, sur les externalités des systèmes réformés, sur la productivité, etc.

A moyen terme, et même parfois à court terme, ne rien changer est une fuite en avant mortifère. Des études, notamment en Colombie (Contreras, 2024), montrent un lien entre intensification des systèmes de production, érosion, perte de nutriments, dégradation de la qualité des sols et baisse de productivité. Des pertes de sensibilité de souches de cercosporiose noire à des fongicides systémiques (Gibert, 2025) apparaissent dans de nombreuses régions de production du fait de mauvaises pratiques. C'est sans parler des effets dévastateurs d'une utilisation continue depuis des décennies de pesticides de synthèse sur les écosystèmes, les travailleurs et les riverains. Le *backlash* mondial en ces domaines ne pousse pas à l'optimisme. L'heure n'est pas à se préoccuper des effets environnementaux et sociaux des activités humaines ou des effets mondiaux de nos systèmes de production, de commercialisation ou même de notre diète alimentaire.

### **Une responsabilité des autorités publiques**

Pourtant, les signaux faibles peuvent se muer rapidement en signaux forts et il semble que le secteur soit à la croisée des chemins. Une des impulsions décisives viendra assurément des pouvoirs publics. C'est le seul levier suffisamment puissant pour faire bouger les lignes. L'impulsion ne doit pas seulement venir des pays importateurs mais aussi, et peut-être même avant tout, des autorités nationales des pays producteurs qui sont au premier rang concerné par les externalités négatives de cette industrie. Vu du stade importation, on prendra ici l'exemple récente d'une initiative unilatérale de la France. Par arrêté pris en janvier 2026, elle a interdit à l'importation et à la mise en marché sur son sol, une liste de fruits, légumes et céréales présentant des traces (on ne parle pas ici de respect des limites maximales de résidus) de cinq substances actives. Cela donne une idée du pouvoir réformateur des autorités publiques. Pour ce qui est des espèces tropicales ou subtropical, on y trouve l'avocat, la mangue ou encore la papaye. La banane n'est pas sur la liste noire alors même qu'elle est une grande utilisatrice d'un des pesticides ciblés : le mancozèbe. Mais la banane a ceci de différent des autres produits, qu'elle n'est plus un simple fruit mais un objet politico-économico-sociétal. Elle fait partie des incontournables du rayon. Premier fruit consommé, fruit anti-inflationniste, colonne vertébrale de nombreuses entreprises au sud comme au nord, politiquement hautement inflammable dans les relations commerciales internationales, etc. bref on ne touche pas à l'économie de la banane. Reste que les opérateurs ont retenu leur souffle à la parution de l'arrêté. Ils ont, pour certains, bataillé pour ne pas retrouver le produit dans une des listes et notamment celle concernant le mancozèbe. Quoi qu'il en soit, ils concèdent aussi que cette fois-ci, ils ont senti le vent du boulet. A les entendre, ils sortiraient du fantasme d'immunisation absolue (Neyrat, 2008). Cela serait parfait. Car en effet, on ne révolutionne pas de telles

chaînes de valeurs à coup d'arrêté. Le processus doit être pro-actif, inscrit dans le temps (notion de trajectoire de transition), rythmé par des jalons (exemple réduction de x % de l'usage de tel ou tel pesticide) et impérativement contextualisé (les enjeux et approches sont différentes selon les climats et surtout les régimes de pluie). L'autre face de la même pièce, est bien-entendu l'indispensable prise en compte des coûts / bénéfiques des changements par l'ensemble des acteurs de la filière. C'est ici la notion de responsabilité partagée qui doit passer du concept marketing mise en avant notamment par les distributeurs européens à une réalité. Et que l'on ne réduise pas l'accompagnement à la seule augmentation du prix d'achat. C'est bien entendu une composante importante mais pas la seule. Il faut là aussi innover et explorer des domaines aussi variés que les systèmes assurantiels, les classiques signes de reconnaissance ou de qualité, le marketing et le merchandising, les engagements long terme, les clauses de référencement qui permettent de ne pas disqualifier un système qui dérive provisoirement, les normes de qualité et foncièrement celles qui relèvent de la cosmétique des produits, etc.

### **Une R&D paupérisée**

Le changement de paradigme généralisé est proche. Reste à savoir si on met à profit ce temps pour redonner de la valeur y compris économique à cette filière ou si l'on subit les conséquences destructrices en ne faisant qu'au mieux s'adapter à la marge. Pour les plus rétifs au changement, c'est par la variété résistante que viendra le salut... pour les plus raisonnables c'est bien une approche holistique qui bénéficiera, des avancées de la génétique, tout en repensant l'ensemble des systèmes de production et de commercialisation. Abandonner l'idée qu'à un problème correspond une solution, c'est accepter l'idée d'un monde de plus en plus complexe impliquant une approche elle aussi plus élaborée.

Quelques mots sur les efforts de R&D qui sont indispensables à concevoir les modes de production durable de demain. Sauf à penser que nous prêchons pour notre paroisse de chercheurs, force est de constater que la filière ne mobilise pas les moyens suffisants au regard des enjeux exposés précédemment. Dans un récent entretien au quotidien équatorien *Expresso* (12 janvier 2026), Monica Betancourt, la patronne de la recherche bananière colombienne déplorait des crédits pour la recherche publique faméliques livrant ainsi l'avenir du secteur (notamment sur les aspects de création variétale) aux recherches menées par des laboratoires privés. Le Directeur de l'Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP Equateur) prêchait aussi pour une augmentation des budgets de recherche. Raúl Jaramillo pointait du doigt que les secteurs de la banane dessert et de la banane plantain absorbait 60 % des fonds de recherche agronomique du pays soit la somme dérisoire de 600 000 dollar US par an.

L'arrivée de la TR4 dans le Sud du pays semble avoir activé d'autres fonds. Dommage qu'il faille une situation d'urgence pour parler R&D. Les sommes mobilisées seront à parier ridicules comparées aux enjeux. Rappelons juste pour fixer les ordres de grandeur que les recettes tirées des exportations de banane dessert et de plantain représentent des recettes au stade export de plus de 4 milliards de dollar US en 2025 et se classe comme le 3<sup>ème</sup> secteur exportateur (hors minier et pétrolier) derrière celui des crevettes et du cacao.

L'amélioration variétale du bananier est un bon exemple d'une activité qui doit être menée sur le très long terme et qui est par nature très consommatrice de moyen. L'effort doit être continue si l'on considère, à juste raison, que la voie du changement variétale est une des solutions pour endiguer les effets dévastateurs des fusarioses, pour participer à la réduction de l'usage des pesticides dans la lutte contre la cercosporiose noire et se préparer aux prochaines ruptures. L'obtention de variétés résistantes ou au moins tolérantes, compatibles avec la normalisation et l'uniformisation d'un marché totalement formaté par la Cavendish, productive, etc. est un challenge immense. Le Groupe Cirad - Vitropic participe à cet effort de recherche grâce notamment à des fonds alloués par les autorités françaises ([www.banaplus.org](http://www.banaplus.org)). Il est vrai que l'avenir de la production et l'exportation française de banane aux Antilles est intimement lié à un changement variétal à moyen terme.

Là encore, il faudra que les acteurs des filières et notamment le commerce, fasse preuve d'une grande adaptabilité. L'enjeu est moins de viser une Cavendish résistante, même si le Groupe Cirad travaille à cela, mais à proposer une diversification des marchés par la mise au point d'hybrides résistants. Mais cela nécessitera de changer une grande partie des pratiques : emballage, logistique, durée de vie verte et jaune, process de murissage, etc. La production devra aussi découvrir et apprendre une grande partie des règles de décision mises au point uniquement et cela depuis les années 1960 sur Cavendish (fertilisation, œilletonnage, date de récolte, etc). Le jeu en vaut la chandelle car au-delà de la résistance aux maladies et ravageurs, diversifier le marché c'est aussi faire l'hypothèse que la segmentation et le renouvellement de l'offre permettront de casser le principe infernal qui veut que l'on détruise de la valeur ajoutée (Loeillet, 2026).

### **Un autre monde bananier est à portée de main**

Penser le monde comme en schumpetérien ne permettrait en rien d'abattre les murs qui se dressent devant toutes les parties prenantes de la filière banane mondialisée. On ne construira rien de neuf et de résilient sur les cendres d'une filière qui aura pressée jusqu'à la dernière goutte son environnement agricole et ses hommes. D'autant, qu'il

y a des solutions à la dérive actuelle. Les pratiques vertueuses ne sont pas toutes faciles à mettre en œuvre mais beaucoup ont faits leurs preuves et sont des technologies désormais matures. Rappelons en quelques-unes en signe d'espoir. La systématisation de la plantation sur sol assaini grâce à une jachère qui permet un vide sanitaire couplée à l'usage d'un matériel de plantation sain via le recours à des vitroplants indemnes de virus et de maladie, est un levier agroécologique fort. On pourra aussi mettre en place une gestion raisonnée de la lutte contre la cercosporiose noire qui veut que le traitement soit déclenché si et seulement si le niveau de contamination le nécessite. Dans le même ordre d'idée, on adoptera des stratégies d'alternance dans l'utilisation des fongicides systémiques pour repousser voire éviter l'apparition de souches de champignon résistantes à telle ou telle famille de molécules. On pratiquera aussi le piégeage par phéromone des charançons. L'utilisation de plantes et dans le futur d'arbres de service permettront de poursuivre plusieurs objectifs comme l'amélioration de la fertilité du sol, de son état structural, de la séquestration du carbone, etc. (Risède, 2018), voire de contribuer à l'impératif d'une adaptation et d'une mitigation des effets du changement climatique. On l'a vu précédemment, le changement variétal est aussi à portée de main.

L'avenir se dessine aujourd'hui et il sera ce que les parties prenantes de cette filière voudront pour l'avenir d'un secteur qui couvre un demi-million d'hectares, occupe des centaines de milliers de personnes à travers le monde et fournit à une très large population un aliment sain et compétitif.

## RÉFÉRENCES

- Contreras MA. 2024. Manejo de nutrición, agua y sostenibilidad del banano: La experiencia en Uraba, Colombia. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 1(1): 90
- Baret P. 2017. Quelle approche système pour construire des trajectoires de transition. In : Conférence au Colloque de clôture du projet Format. Coexistence des modèles agricoles et alimentaires : un nouveau paradigme du développement territorial? Inra, Cirad, Paris, 29 juin 2017
- Côte, *et al.* 2024. Rapport final de l'initiative " Pesticide Reduction for Tropical Agricultures " (Pretag). Côte François-Xavier, Le Bellec Fabrice, Martin Thibaud, Temple Ludovic, Blouin Annaig, Loeillet Denis, Baufume Servane, Ghneim Herrera Thaura. 2025. 2023-2024. Montpellier: CIRAD, 143 p. <https://doi.org/10.18167/agritrop/00835>
- Côte, *et al.* 2022. Levers for the agroecological transition of tropical agriculture. Côte François-Xavier, Rapidel Bruno, Sourisseau Jean-Michel, Affholder François, Andrieu Nadine, Bessou Cécile, Caron Patrick, Deguine Jean-Philippe, Faure Guy, Hainzelin Etienne, Malézieux Eric, Poirier-Magona Emmanuelle, Roudier Philippe, Scopel Eric, Tixier Philippe, Toillier Aurélie, Perret Sylvain. 2022. *Agronomy for Sustainable Development*, 42 (4):67, 11 p. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00799-z>Côte, 2024. Rapport définitif Pretag
- Dawson C. 2025. Communication aux professionnels de la filière banane en France. Commission de suivi du marché de la banane. Odeadom. France. Décembre 2025.

- Gibert, *et al.* 2025. Évaluation de la résistance aux fongicides des populations de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la Cercosporiose Noire des bananiers, en Martinique - Campagne 2024. Gibert Simon, De Lapeyre de Bellaire Luc, Daribo Marie-Odette, Sainte Rose Jérôme, Pagès Christine, Lubin Nadia, Carlier Jean. 2025. Montpellier: CIRAD, 12 p.
- Jourdain E. 2021. Les Communs. Que sais-je? Presses Universitaires de France 128 pages
- Loeillet, *et al.* 2025. Retour d'expérience sur le processus de transition vers des systèmes de production moins consommateurs de pesticides de synthèse dans les filières bananes d'exportation. Loeillet Denis, Blouin Annaïg, Risède Jean-Michel, De Lapeyre de Bellaire Luc, Cote François-Xavier. 2025. Montpellier: CIRAD, 18 p.
- Loeillet. 2026. Banane et inflation. La processus de destruction de la valeur se met en pause. FruiTrop n°302 pages 56 à 60, janvier 2026.
- Neyrat F. 2008. Biopolitique des catastrophes, Editions MF Collection « Dehors »
- Risede, *et al.* 2018. La transition agro-écologique des systèmes de culture de bananes Cavendish aux Antilles françaises. Pages 107-26. In La transition agro-écologique des agricultures du Sud, Côte *et al.*, AFD, Cirad, Editions QUAE, Versailles, 368 p.
- Ritter T, *et al.* 2024. A socioeconomic and cost benefit analysis of Tropical Race 4 (TR4) prevention methods among banana producers in Colombia. Ritter T, Alvarez D, Mosquera LE, Martey E, Mockshell J (2024) PLoS ONE 19(10): e0311243. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311243>
- Varma V, *et al.* 2025. Socio-economic factors constrain climate change adaptation in a tropical export crop. Mosedale JR, Guzmán Alvarez JA, Bebbler DP (2025), Nature food. <https://doi.org/10.1038/s43016-025-01130-1>

## Caracterización socio-agronómica de fincas plataneras en la provincia de Limón, Costa Rica

Vesalio Mora Calvo<sup>1</sup>, Patricio Rojas Sanabria<sup>2</sup>, Nancy Chaves Méndez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>COMCURE-MINAE, Costa Rica, <sup>2</sup>MAG, Siquirres, <sup>3</sup>Consultora

**\*Autor de correspondencia:**

Vesalio Mora Calvo  
vmora@minae.go.cr

**Contribución:**

Artículo Científico

**Sección:**

Transferencia tecnológica

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Mora Calvo V, Rojas Sanabria P, Chaves Méndez N. 2026. Caracterización socio-agronómica de fincas plataneras en la provincia de Limón, Costa Rica. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 147  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26147>

### RESUMEN

El estudio establece una caracterización socio-agronómica de fincas productoras de plátano, identificando tecnologías, niveles de producción y oportunidades de mejora. Se aplicaron 342 encuestas estructuradas en seis cantones de la provincia de Limón, identificando tres tipos de finca según rendimiento, prácticas agronómicas y perfil de la persona productora. Las fincas tipo 1 (10.4 %) fueron más eficientes, alcanzando 48,8 t/ha/año en áreas menores a 1 ha, con prácticas como densidades superiores a 2 000 plantas ha<sup>-1</sup>, cormos seleccionados con peso de 500–800 g, fertilización con sulfato de amonio, embolsado y renovación bianual del cultivo. Estas fincas fueron gestionadas mayoritariamente por personas menores de 50 años, asociándose esta variable con una mayor adopción tecnológica y orientación a resultados. Aunque sin cifras exactas de rentabilidad neta, los indicadores de eficiencia en el uso de insumos y manejo agronómico sugieren una elevada relación beneficio/costo, además de un bajo riesgo a sufrir Inseguridad alimentaria.

**Palabras clave:** Sistemas de producción, Extensión rural, Rentabilidad, Eficiencia productiva, Seguridad alimentaria

### ABSTRACT

This study characterizes plantain-producing farms in the Caribbean region of Costa Rica, identifying technologies, production levels, and opportunities for improvement. Three types of farms were conducted in six cantons, identifying three types of farms based on yield, agronomic practices, and producer profile. Type 1 farms (10.4%) were more efficient, reaching 48.8 t/ha/year in areas smaller than one hectare, applying practices such as densities greater than 2 000 plants ha<sup>-1</sup>, the use of selected corms weighing 500–800 g ammonium sulfate fertilization, bagging and biannual crop renewal. These farms were mostly managed by people under 50 years of age, a variable associated with greater technological adoption and results-orientation. Although exact figures for net profitability are unavailable, indicators of efficiency in input use and agronomic management suggest a high benefit/cost ratio, as well as a low risk of food insecurity.

**Keywords:** Production systems, Rural extension, Technology adoption, Profitability, Food security



## INTRODUCCIÓN

En Costa Rica se cultivan 56.872 hectáreas (ha) de musáceas, el 25 % lo producen pequeños productores de plátano, banano dátil (1 000 ha), banano criollo (3 000 ha) y otras variedades (Vallejo *et al.* 2020). El plátano constituye un componente esencial en la dieta y en la economía rural de la región Caribe, donde abarca 3.354 fincas y 4.955,9 ha, con un rendimiento anual promedio de 16 t ha<sup>-1</sup>, representa el 39.7 % de las fincas y el 24.2 % del área cultivada de la región (CENAGRO-INEC, 2015). La actividad enfrenta problemas debido a la baja productividad y la poca adopción de tecnología por las familias productoras. El cultivo de plátano se produce de manera convencional por pequeñas y grandes empresas mientras que, la forma tradicional se utiliza a menor escala por la población indígena. La producción pequeña, en su mayoría, usa el cultivo en una economía de subsistencia y para consumo en sus hogares (Russo y Ureña 2006).

Estudios previos han señalado la necesidad de comprender la diversidad de sistemas de producción para diseñar estrategias diferenciadas de asistencia técnica. Sin embargo, existe escasa información sistematizada sobre la tipología de fincas plataneras en el Caribe costarricense, por ello este estudio se planteó el objetivo de caracterizar social y agronómica las fincas plataneras en la provincia de Limón, Costa Rica, identificando patrones en el manejo agronómico, nivel tecnológico y productividad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** La provincia de Limón, Costa Rica, no presenta una estación seca definida, las lluvias se mantienen entre los 100 y 200 mm en los meses menos lluvioso (Manso *et al.*, 2005) con zonas clasificadas desde Bosque Húmedo Tropical a Bosque Muy Húmedo tropical (Holdridge, 1987). Con suelos aluviales y coluviales ideales para el cultivo de musáceas. La producción agropecuaria primaria es la principal actividad económica en el territorio, en especial en la producción, comercialización y manejo de plantaciones de cacao, plátano, banano y producción pecuaria (Manso *et al.*, 2005).

**Recolección de la información.** Para recabar la información, se tomó la base de datos de 1.216 fincas de plátano del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en la región Huetar Caribe y se seleccionaron 342 fincas (I.C.=95 %) para aplicarles una encuesta semiestructura, conformando así una muestra representativa, aleatorizada y ponderada según la cantidad de fincas plataneras en cada cantón de la región.

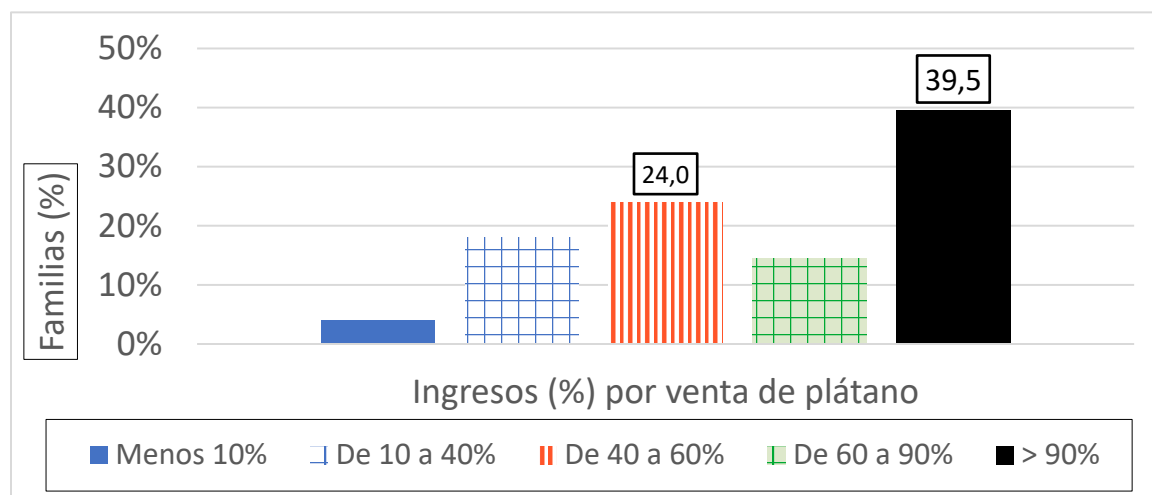
**Análisis de datos.** Se utilizó el programa de computadora *Open Data Kit* (ODK) (<https://opendatakit.org/>) para la recolección de datos utilizando dispositivos móviles y la información recolectada fue enviada a un servidor en línea. Para analizar las bases

de datos, se utilizó la plataforma Formshare (<https://formshare.org/>), que maneja datos colectados en dispositivos móviles.

Para comparar y determinar diferencias significativas en la productividad de las fincas, se realizó un análisis de varianza para la variable productividad ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) por semana y por cantón. Para análisis de las medias se realizó una prueba de Duncan que permitió determinar diferencias entre medias. Con la información de fincas, se hizo un análisis de conglomerados jerárquicos o Método de Ward en el que, en cada etapa, se unen dos conglomerados con el propósito de encontrar aquellos dos conglomerados cuya unión proporcione el menor incremento en la suma total de sus errores.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para conocer los tipos de fincas productoras de plátano, se realizaron 342 encuestas en fincas seleccionadas aleatoriamente. Los resultados obtenidos muestran que la actividad platanera representa una importante fuente de ingresos para las familias, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Porcentaje de ingresos familiares producto de las ventas del plátano.

Como se aprecia en la figura, el 39.5 % de las familias depende exclusivamente de la venta del plátano, mientras que en el 24 % de las familias la venta de plátano representa casi la mitad de los ingresos totales. En estas fincas, los ingresos familiares son complementados con jornales (39 %) y con pensión (28 %) como las otras dos fuentes de ingresos mayormente.

Los ingresos son generados por fincas con un área promedio de 6.4 hectáreas, de las cuales se destina la mitad para la producción de plátano, el 62 % como monocultivo y 38 % con manejo en sistemas agroforestales (SAF).

Para ampliar en las diferencias de manejo, es importante mencionar que el cantón de Talamanca se divide en Alta Talamanca (distritos Bratsi y Telire) con predominancia de población indígena (Román y Morales, 2018) y donde se concentran el 60 % de las fincas plataneras del cantón, ubicadas en suelos de pie de monte, con participación femenina en labores del cultivo en el 80 % de las fincas, una producción estimada de 19.5 t/ha/año, densidades menores a 1 400 plantas ha<sup>-1</sup> con manejo SAF y con certificación de producción orgánica en la mayoría de las fincas. Mientras tanto, la Baja Talamanca (distritos Sixaola y Cahuita) comprende 40 % de las fincas con un rendimiento promedio es de 28.0 t/ha/año, con aplicación de agroquímicos en suelos aluviales y solo en el 20 % de las fincas participan las mujeres.

También hay diferencias importantes en las densidades de siembra, en Baja Talamanca el 10 % de las fincas tienen densidades mayores de 2 000 plantas ha<sup>-1</sup> (Figura 2) consideradas como alta densidad, mientras el 38 % manejan densidades menores a 1 400 plantas ha<sup>-1</sup>.



**Figura 2.** Cultivo de plátano en alta densidad en distrito Sixaola (Fotografía: P. Rojas).

En el caso de fincas con manejo SAF (Figura 3) se presenta un asocio de plátano con cacao, otras musáceas y árboles maderables, especialmente en los distritos que comprenden territorio indígena en Alta Talamanca.



**Figura 3.** Plátano con manejo SAF en asocio con cacao (Fotografía: P. Rojas).

No solo en las densidades de siembra se diferencian las fincas ya que, a excepción de la Alta Talamanca, las fincas de la Baja Talamanca, así como de los otros cinco de cantones de la región, el uso de agroquímicos es una práctica usual, como se observa en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Promedio del uso de plaguicidas, fertilizantes y métodos de siembra para la producción de plátanos.

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Usa Nematicida	66 %
Usa Nematicida (Terbufos)	84 %
Controla Sigatoka Negra	39 %
Fertiliza	79 %
Núm. de aplicaciones/año	5,1
Quintales/ha/año	12,9
Usa fertilizante 10-30-10	56,4 %
Usa Urea	49 %
Selecciona semilla	60 %
Cura la semilla para la siembra	69 %

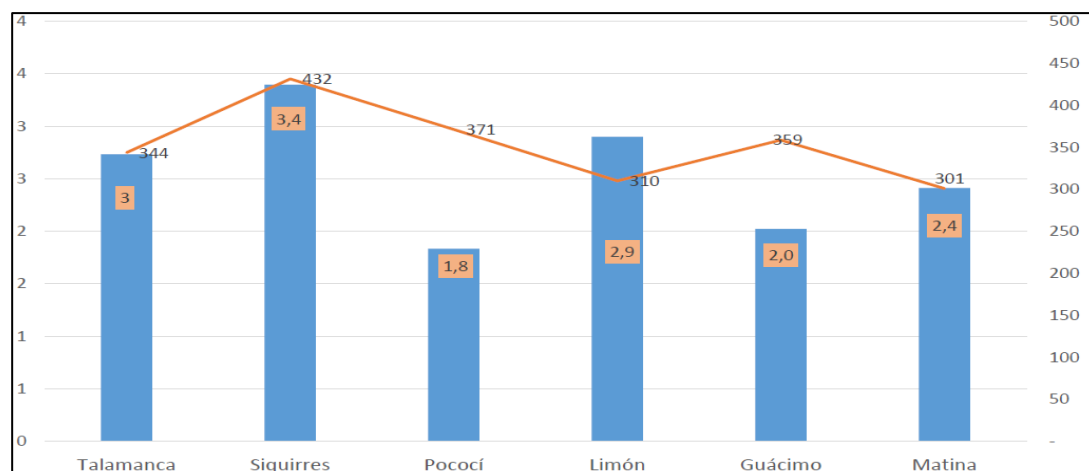
Se aprecia como el uso de nematicidas, en particular Terbufós y la aplicación de fertilizantes químicos son las dos prácticas más usuales. Mientras tanto, el combate de Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijensis*) no es una práctica rutinaria. El uso de fertilizante químico es una práctica común con 5.1 aplicaciones a razón de 12.9 quintales/ha/año, aunque las dosis y fórmulas aplicadas se hacen por experiencia del propietario y solo el 13 % por recomendación técnica. En lo referente al manejo de la semilla, más de la mitad de las fincas selecciona y hace tratamiento (curación) de la semilla para la próxima siembra.

Con la situación descrita, se analizaron las fincas por cada municipio, con diferencias importantes como lo muestra el cuadro a continuación.

**Cuadro 2.** Area total cultivada y productividad en kg/ha/semana por municipio.

<b>Municipio</b>	<b>Area (ha) total cultivada</b>	<b>Productividad (kg/ha/semana)</b>	<b>Encuestas por cantón</b>
	Promedio	Promedio	
Talamanca	3,0	344	123
Siquirres	3,4	432	59
Pococí	1,8	371	75
Limón	2,9	310	11
Guácimo	2,0	359	34
Matina	2,4	301	40

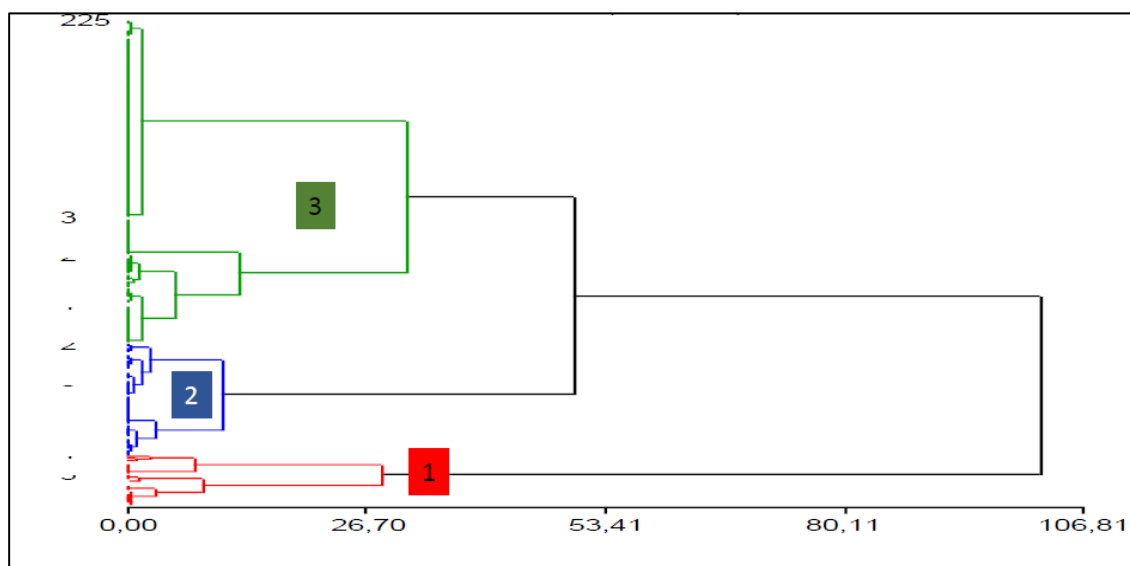
Aunque Talamanca es el municipio con mayor número de fincas y encuestas, el rendimiento (344 kg/ha/semana) es menor al de Siquirres (432) y Pococí (371 kg). El municipio con menor rendimiento es Matina seguido de Limón. La diferencia entre municipios también se evidencia en las áreas de cultivo, siendo el municipio de Siquirres el que tiene fincas de mayor extensión, como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Área (ha) cultivada y productividad (racimos/ha/semana/cantón).

El municipio con mayor producción de musáceas es Siquirres, seguido de Pococí, aunque Pococí es el cantón con menor área por finca destinada a este cultivo.

Con la información obtenida se realizó un análisis con método Ward, en el que en cada etapa se unen dos con el propósito de encontrar aquellos conglomerados cuya unión proporcione el menor incremento en la suma total de sus errores. El análisis se realizó con base en la productividad de cada finca (kg/ha/semana) y según el análisis de varianza las fincas se dividieron en tres tipos, que presentaron diferencias significativas entre sí, como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5.** Tipología de fincas según su productividad con el Método Ward.

Las fincas de tipo 1 son las más eficientes por el uso de insumos y rentabilidad; alcanzan 48.8 t/ha/año y representan solo el 10.4 % del total. Su mayor productividad se explica por las altas densidades de siembra (>2 000 plantas/ha), uso de semilla seleccionada (cormos 500–800 g) manejo agronómico intensivo (fertilización dirigida, embolsado, apuntalamiento) productores más jóvenes y con mayor adopción tecnológica, no presentan disminución productiva, sino una eficiencia sostenida en el tiempo.

El Cuadro 3 muestra las características de producción de cada conglomerado y los errores estándar de las medias con la prueba de Duncan que evidencian que existe diferencia significativa entre la productividad de las fincas.

**Cuadro 3.** Análisis de varianza de la productividad de las fincas.

Tipo de finca	Kg/ha/semana (Racimos)	t/ha/año	N	E.E.
1	938,1 (93,8)	48,8	35	21,83A
3	339,5 (42,4)	17,7	221	8,69B
2	166,5 (20,8)	8,7	77	14,72C

Prueba de Duncan  $\alpha = 0,05$

Este cuadro resume las variables consideradas comparadas y muestra diferencias significativas según los tipos de fincas de plátano. El área sembrada del tipo 1 es significativamente diferente a los tipos 2 y 3; sin embargo, los tipos 2 y 3 no son significativamente diferentes entre sí. La mayor producción también incide en las posibilidades de acceso a los alimentos por parte de las familias siendo que, para determinar diferencias significativas en variables, se realizó comparación entre los tipos de fincas según el cuadro a continuación.

El análisis revela que las diferencias en productividad entre tipos de finca trascienden el ámbito agronómico y se constituyen en determinantes estructurales de la Seguridad Alimentaria y Nutricional (SAN). El plátano cumple un rol dual como alimento básico y principal fuente de ingresos, por lo que las variaciones en su rendimiento inciden directamente en los pilares de disponibilidad, acceso, utilización biológica y estabilidad.

**Cuadro 4.** Variables consideradas según tipo de finca.

<b>Variable</b>	<b>Tipo 1</b>	<b>Tipo 2</b>	<b>Tipo 3</b>
Participación (%)	10,4	22,5	66,4
Productividad (t/ha/año)	48,8	8,7	17,7
Densidad de siembra	>2.000	<1.400	<1.800
Renovación del cultivo	1–2 años	4–5 años	>5 años
Riesgo SAN	Bajo	Alto	Medio–alto

Las fincas tipo 1 presentan alta productividad garantizando disponibilidad constante y acceso económico a alimentos. En contraste, las fincas tipo 2 enfrentan una situación crítica de SAN al depender del plátano para autoconsumo e ingresos, limitando disponibilidad, acceso y estabilidad.

En Alta Talamanca, con predominio de SAF y producción orgánica, la menor productividad se compensa con diversificación alimentaria (cacao, yuca, banano, achote), menor dependencia del mercado y mayor estabilidad alimentaria culturalmente adaptada.

## CONCLUSIONES

La producción de plátano presenta una alta dependencia económica para una proporción significativa de las familias, ya que el 39 % obtiene más del 90 % de sus ingresos de este cultivo, aunque existe una marcada diversificación en casi la mitad de los hogares.

Se evidencian fuertes diferencias territoriales en tamaño de finca y productividad, donde fincas del municipio de Siquirres destacan por mayores áreas y rendimientos, mientras que en Pococí y Matina muestran limitaciones estructurales que afectan la producción.

El uso de insumos y los sistemas productivos varían sustancialmente entre municipios y distritos. En Talamanca, en el distrito Sixaola predomina el uso intensivo de fertilización química y el monocultivo, mientras que en el distrito de Bratsi se observa una mayor adopción de sistemas agroforestales y un menor uso de insumos químicos, lo que refleja estrategias productivas diferenciadas y potenciales beneficios ambientales.

El análisis Ward permitió identificar tres tipos de fincas con niveles contrastantes de eficiencia y productividad, confirmando la heterogeneidad del sector. Esta clasificación constituye una herramienta clave para diseñar estrategias de intervención diferenciadas, optimizar la transferencia tecnológica y promover prácticas productivas más sostenibles y rentables, en concordancia con evidencias de otros contextos agrícolas y económicos.

La disminución de la producción entre fincas se explica principalmente por diferencias estructurales, tecnológicas y socio-productivas asociadas a cada tipo de finca, lo cual tiene implicaciones directas sobre la seguridad alimentaria de los hogares rurales

La disminución de la producción no es solo un problema técnico, sino un factor que aumenta la vulnerabilidad económica compromete la seguridad alimentaria familiar y profundiza brechas territoriales y generacionales.

En conjunto, los resultados subrayan la necesidad de políticas y programas diferenciados, que reconozcan la diversidad productiva y territorial, fortalezcan las capacidades técnicas y digitales, y promuevan modelos productivos sostenibles e inclusivos, como vía para mejorar la competitividad, la seguridad alimentaria y el desarrollo rural.

## REFERENCIAS

- Holdridge LR. 1987. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). 2020. *Encuesta Nacional Agropecuaria 2020: Resultados generales de la actividad agrícola y forestal*. <http://sistemas.inec.cr/pad5/index.php/catalog/280/download/3818>
- Manso P, Stolz W, Fallas JC. 2005. El régimen de la precipitación en Costa Rica. *Revista Ambientico*, 144, 7-8
- Román M, Morales N. 2018. Región Huetar Caribe: situación socioeconómica y principales desafíos. <https://bit.ly/3JUbZg7>
- Russo R, Ureña E. 2006. The banana sector in the atlantic region of Costa Rica. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 119, 52-55. <http://usi.earth.ac.cr/glas/sp/50000242.pdf>
- Vallejo M, Chacón M, Laprade S. 2020. Lineamientos para el diseño de NAMA musáceas (Nota Conceptual). <http://www.mag.go.cr/asuntos-internacionles/Nota-Conceptual-NAMA-Musaceas.pdf>

## Modelo de extensión y transferencia de tecnología de la Corporación Bananera Nacional para productores de banano de exportación

Erick Antonio Bolaños Céspedes<sup>1\*</sup>, Víctor Wesly Farulla Barrantes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dirección de Asistencia Técnica Corporación Bananera Nacional S.A. (CORBANA)

**\*Autor de correspondencia:**

Erick Antonio Bolaños  
Céspedes  
ebolanos@corbana.co.cr

**Contribución:**  
Artículo Científico

**Sección:**  
Transferencia Tecnológica

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**  
Bolaños Céspedes EA, Farulla  
Barrantes VW. 2026. Modelo  
de extensión y transferencia de  
tecnología de la Corporación  
Bananera Nacional para  
productores de banano de  
exportación. *Acorbat Revista  
de Tecnología y Ciencia* 3(1):  
148  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26148>

### RESUMEN

La Corporación Bananera Nacional (CORBANA S.A.), como ente público no estatal, ha consolidado un modelo de extensión agrícola que integra asistencia técnica, transferencia de tecnología y programas de capacitación, orientados a fortalecer la productividad, sostenibilidad y competitividad del sector bananero de exportación en Costa Rica. Desde la creación de la Dirección de Asistencia Técnica en 2003, se ha desarrollado el programa de extensión dirigido a empresarios bananeros del Caribe y Pacífico costarricense, clasificados en productores nacionales que concentran 20 204,74 hectáreas, representados por el 47.88 % del área total y organizados en 20 grupos o fincas independientes (85 fincas); mientras que las compañías transnacionales abarcan 21 993,91 hectáreas, equivalentes al 52,11 % restante, agrupadas en 4 grupos y 85 fincas para un total general de 170 fincas. Este modelo se fundamenta en un enfoque participativo y bidireccional entre sus diferentes actores, que adapta y contextualiza los paquetes tecnológicos de la investigación a las necesidades específicas de las fincas, mediante diferentes metodologías como visitas periódicas de asesoramiento, encuestas, talleres, capacitaciones y evaluaciones continuas. Los resultados de estos programas muestran un nivel de adopción tecnológica en promedio del 63 % entre los años 2019 y el 2024, evidenciando beneficios agronómicos y económicos para el empresario. El éxito de este modelo bidireccional investigación-extensión con el empresario se explica por la integración equilibrada de factores económicos, sociales y ambientales, posicionando a CORBANA S.A como referente en la innovación y acompañamiento técnico para la industria bananera costarricense.

**Palabras clave:** Asistencia técnica, Transferencia de tecnología, Adopción de tecnología, Paquetes tecnológicos, Sostenibilidad

### ABSTRACT

The National Banana Corporation (CORBANA S.A.), as a non-state public entity, has consolidated an agricultural extension model that integrates technical assistance, technology transfer, and training programs aimed at strengthening the productivity, sustainability, and competitiveness of Costa Rica's export banana sector. Since the creation of the Technical Assistance Directorate in 2003, an extension program has been developed for banana entrepreneurs on Costa Rica's Caribbean and Pacific coasts, classified into national producers, who manage 20,204.74 hectares, representing 47.88% of the total area and organized into 20 groups or independent farms; while transnational companies cover 21,993.91 hectares, equivalent to the remaining 52.11%, grouped into 4 groups, for an overall total of 170 farms. This model is based on a participatory, two-way approach among its different stakeholders, which adapts and contextualizes research technology packages to the specific needs of the farms through various methodologies such as periodic advisory visits, surveys, workshops, training activities, and continuous evaluations. The results of these programs show an average level of technological adoption of 63% between 2019 and 2024, demonstrating agronomic and economic benefits for the entrepreneurs. The success of this



bidirectional research–extension model with entrepreneurs is explained by the balanced integration of economic, social, and environmental factors, positioning CORBANA S.A. as a benchmark in innovation and technical support for the Costa Rican banana industry.

**Keywords:** Technical assistance, Technology transfer, Technological adoption, Technological packages, Sustainability

## INTRODUCCIÓN

La Corporación Bananera Nacional, es un ente público no estatal que se encarga brindar apoyo en investigación, asistencia técnica, política bananera y crédito a los productores bananeros de Costa Rica. Los productores bananeros, pagan un impuesto a CORBANA S.A. de \$0.05 por caja exportada, recursos que se utilizan para los diferentes programas antes indicados.

La Dirección de Investigaciones de CORBANA S.A. fue creada en 1979, con el objetivo de brindar información científica y técnica al productor-empresario bananero y dejar de depender directamente de la información generada por las compañías transnacionales, comercializadoras de fruta.

Antes del 2003, los resultados de investigación se limitaban a publicaciones oficiales o material divulgativo que no llegaba con facilidad al empresario bananero (Bolaños-Céspedes, 2008). Esta situación obedecía a que no existía el vínculo directo entre el investigador y el empresario por lo que la adopción de tecnología no era efectiva, así mismo, no existía una relación dialógica entre el empresario y el técnico que pudiera determinar las necesidades inmediatas e interrogantes que se tenían en el día a día en el proceso productivo. Se debe recordar que el “cliente” es una persona que ha vivido inmerso en el mundo agrícola, donde no se percibe otro lenguaje que no sea el de la “tierra” por lo que la forma en que se adapte el mensaje es lo que permitirá realizar los cambios esperados (Róling, 1988).

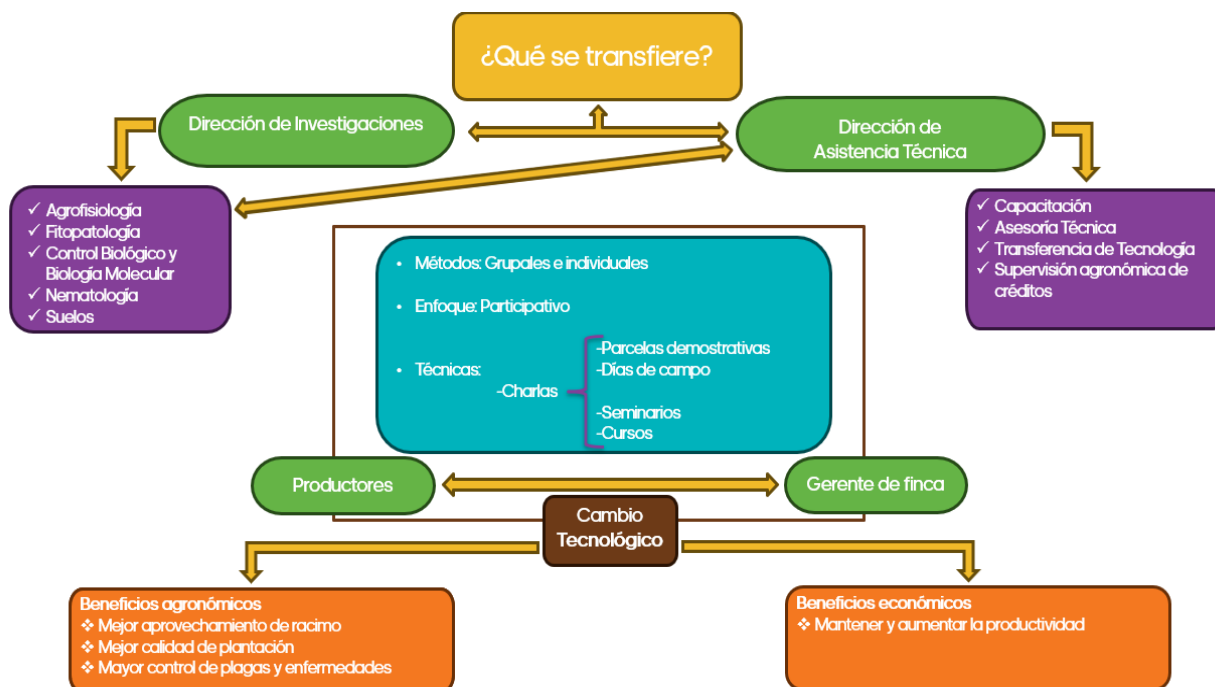
Debido a la necesidad de que los resultados de investigación llegaran en forma oportuna y adecuada al empresario bananero, en el 2003, fue creada la Dirección de Asistencia Técnica con los objetivos de mejorar la productividad y competitividad de la industria bananera costarricense, promover la sostenibilidad, fortalecer la capacidad técnica de los empresarios por medio de la información científica generada y mejorar las capacidades de los empresarios, mandos medios y trabajadores en la ejecución de buenas prácticas agrícolas. Lo anterior a través de la asesoría técnica, la transferencia de tecnología y la capacitación. Dentro de los principales logros alcanzados se encuentran el impacto a 10 de los 17 objetivos de desarrollo sostenible de la ONU.

La Dirección de Asistencia Técnica de CORBANA S.A se ha logrado consolidar con un modelo exitoso de extensión y transferencia de tecnología, el presente trabajo pretende describir el modelo de extensión y para determinar su impacto sobre los empresarios bananeros dedicados a la exportación. Dicho modelo se basa en tres pilares esenciales de la producción como lo son, económico, social y ambiental para lograr el desarrollo sostenible en el cultivo de banano.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para realizar la presente descripción se hace una revisión de la metodología del programa de extensión y sus resultados. La tipología del sector productivo bananero costarricense, al cual se dirige el programa de extensión, se encuentra distribuida entre productores nacionales y compañías transnacionales. Los productores nacionales concentran 20 204,74 hectáreas, que representan el 47.88 % del área total, organizados en 20 grupos o fincas independientes; mientras que las compañías transnacionales abarcan 21 993,91 hectáreas, equivalentes al 52.11 % restante, agrupadas en 4 grupos. Dentro del componente del paquete técnico que se transfiere a los productores se encuentran practicas relacionadas al manejo agronómico como lo son fertilización, manejo de drenajes, control de nematodos, control de enfermedades, control de plagas insectiles, evaluación de la calidad, manejo de poblaciones. Para la determinación de la adopción del paquete tecnológico se realiza una encuesta presencial sobre las practicas realizadas a los grupos de fincas bananeras y con base en la totalidad de las practicas se determina el porcentaje de adopción general.

La Dirección de Asistencia Técnica de CORBANA S.A., encargada de ejecutar el programa de extensión tiene un vínculo con cada una de las unidades técnicas de la Dirección de Investigaciones. La figura 1, detalla las relaciones entre los diferentes actores para la transferencia de los resultados de investigación de forma oportuna en un lenguaje sencillo a los empresarios, mandos medios y trabajadores de las fincas bananeras. Dentro del modelo de extensión, se emplean tanto métodos individuales como grupales, complementados con diversas técnicas como cursos, charlas, seminarios, días de campo y demostraciones técnicas. Esta metodología destaca por ser bidireccional entre los actores involucrados.



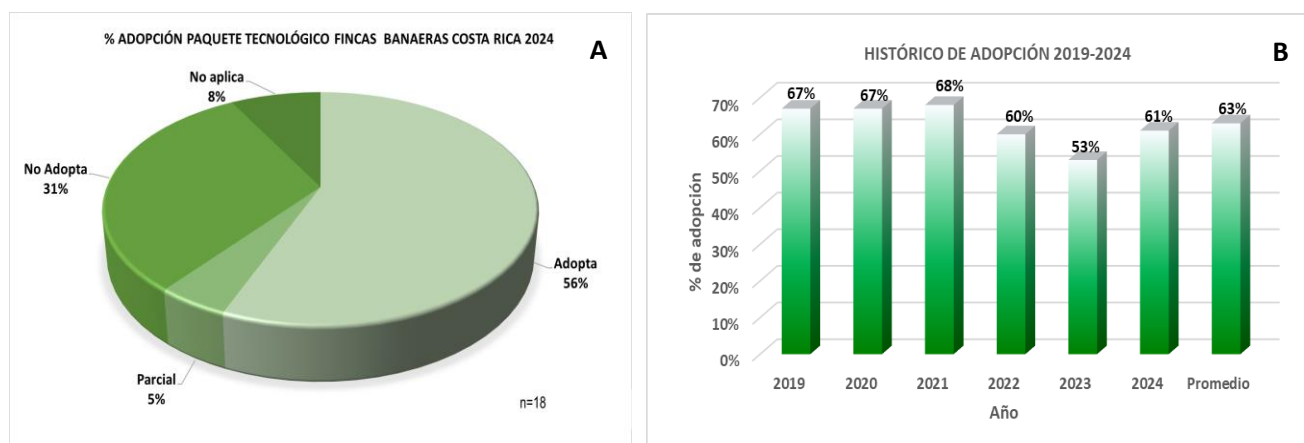
**Figura 1.** Relación investigación-asistencia técnica para la transferencia de tecnología. Fuente: Dirección de Asistencia Técnica 2025.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El programa de extensión y transferencia de tecnología evalúa todos los años mediante encuestas el porcentaje de adopción de los servicios y prácticas recomendadas al empresario bananero costarricense; en la figura 2A se presenta la distribución porcentual de la adopción del paquete tecnológico en las fincas durante el año 2024 (n=18). Los resultados muestran que la mayoría de las fincas adoptan completamente el paquete tecnológico (56 %) lo que evidencia un nivel significativo de apropiación y aplicación de los servicios e investigación que ofrece CORBANA S.A. No obstante, un 31 % de las fincas no adoptan las tecnologías presentadas, lo que refleja la persistencia de barreras estructurales, técnicas, sociales o económicas que limitan la implementación de estas prácticas en las que se están trabajando actualmente.

Asimismo, se observa 5 % una adopción parcial, evidenciando de esta manera que la transferencia tecnológica en este caso no se incorpora de forma completa, sino más bien focalizada en algunos aspectos del paquete tecnológico recomendado por

CORBANA S.A. Finalmente, en un 8 % de los casos se evidencia la categoría “no aplica”, lo cual responde a condiciones específicas de las unidades productivas en las que el paquete no se puede aplicar por razones particulares como escases de la tecnología o recursos económicos en las fincas entre otros.



**Figura 2.A** Adopción del paquete tecnológico en fincas bananeras de Costa Rica durante el año 2024 (n = 18). **B** Histórico de adopción 2019-2024. Fuente: Dirección de Asistencia Técnica 2025.

La literatura de manera consecuente indica que la adopción de las diferentes tecnologías en los cultivos agrícolas está influenciada por variables socioeconómicas y de acceso a los diferentes servicios de extensión por lo tanto no solo es suficiente generar la información, si no que se requiere un acompañamiento técnico para garantizar su apropiación (Quiloango-Chimarro *et al.*, 2022). La figura 2B evidencia que la adopción de prácticas es estable entre 2019 y 2021 (67–68 %), sin embargo, en el 2022 se produjo una caída en este parámetro, dicho descenso coincide con una fluctuación importante en la tasa cambiaria en Costa Rica. Según datos del Banco Central de Costa Rica (2025), a partir de junio de 2022 la tasa de cambio promedio era de 690 colones por dólar y mediados de 2024, se reportó 520 colones por dólar, al aplicar el cálculo  $(TC_{(2022)} - TC_{(2024)} / TC_{(2022)} * 100)$ , utilizado para medir la variación porcentual, se obtiene una depreciación del dólar cercana al 25% durante este periodo. Este comportamiento cambiario podría tener implicaciones relevantes para la adopción y transferencia de tecnología en cultivos de exportación como el banano, dado que las variaciones en el tipo de cambio pueden influir en los costos de producción y en la competitividad del sector.

Por otro lado, se debe reconocer que la adopción de la tecnología no se puede restringir a factores meramente económicos, sino más bien a un conjunto de aspectos que pueden conjugarse entre sí como lo son también otras variantes sociales, culturales

(Mulugo *et al.*, 2020). Es por estas consideraciones que el programa de extensión se evalúa todos los años y con esto ajustar su gestión a las variantes y actores del programa.

**Programas dirigidos al productor.** La Dirección de Asistencia Técnica de CORBANA S.A desarrolla un conjunto integral de programas orientados al fortalecimiento de la productividad y sostenibilidad bananera, entre los que destacan: la radiografía de población, que permite caracterizar plantas y proyectar la producción mediante software de libre acceso, asistencia técnica en postcosecha, con diagnósticos especializados en plantas empacadoras para mejorar la calidad del racimo; herramientas digitales como la aplicación “arvenses” para optimizar decisiones en el control. De manera complementaria, se ejecuta un programa anual de evaluación de la bioseguridad enfocado en la prevención de FOCR4T y otras enfermedades, cuyos resultados están disponibles en línea donde se incluye la retroalimentación de las medidas de bioseguridad para cada finca. Adicionalmente, en coordinación con entes estatales se imparten programas de formación con su respectiva certificación académica que favorecen la inserción laboral de la actividad bananera. Otro programa adicional del programa de extensión son los proyectos de innovación abierta para atender necesidades inmediatas del sector de una forma práctica. Finalmente, se destaca la participación en el programa de crédito que ofrece productos financieros para apoyar al empresario en diferentes áreas como capital de trabajo, renovación de plantaciones, infraestructura e innovación, todo lo anterior con acompañamiento técnico y seguimiento productivo.

En conjunto, todos estos programas refuerzan la sostenibilidad del sector bananero costarricense; la agricultura actual requiere enfoques que no solo incrementen la productividad, sino que también garanticen la sostenibilidad del sistema (Chandra, 2020, citado en Farulla, 2023). Los programas de transferencia de tecnología y extensión de CORBANA S.A se presentan como un modelo de referencia que tiene como objetivo el desarrollo integral de la industria bananera, desde el paradigma de la sostenibilidad social, económica y ambiental.

## CONCLUSIONES

El modelo de extensión agrícola y transferencia de tecnología de CORBANA S.A impacta diez de los 17 objetivos estratégicos de desarrollo sostenible de la ONU, se plantea como un modelo de referencia para desarrollar programas de extensión en banano lo que ha marcado un punto de inflexión desde su creación en el 2003.

Los resultados de adopción del paquete tecnológico evidencian una apropiación mayoritaria de adopción histórica (63 %) y la obtenida en el 2024 un 61 % (56 % total y 5 % parcial), aunque persisten barreras estructurales, técnicas y económicas que limitan la implementación en un porcentaje de empresarios. Esto subraya la necesidad de continuar reforzando procesos de extensión diferenciados, capaces de adaptarse a las realidades de cada unidad productiva y de cada empresario.

Los programas desarrollados por la Dirección de Asistencia Técnica como perfil del racimo, arvenses, radiografía de población, aseguramiento de calidad, bioseguridad, capacitación y apoyo en crédito representan un modelo integral para que el empresario tenga otras herramientas y alternativas para la toma de decisiones y mejorar la productividad de sus fincas.

En su conjunto, el programa de extensión y transferencia de tecnología de CORBANA S.A fortalece los tres pilares de la sostenibilidad: ambiental, social y económico.

## REFERENCIAS

- Bolaños-Céspedes E. 2008. Análisis del servicio de asistencia técnica de CORBANA S.A. Lineamientos para su mejoramiento. Tesis Máster en Ciencias. Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica. 147 p.
- Banco Central de Costa Rica. 2025. Serie histórica del tipo de cambio de referencia del colón costarricense respecto al dólar de los Estados Unidos. Recuperado de <https://www.bccr.fi.cr>
- Farulla-Barrantes V. 2023. Efecto de la fertilización orgánica, inorgánica y su combinación sobre el crecimiento vegetativo y variables de nutrición suelo-planta de banano dátil, (*Musa AA*), en condiciones de invernadero Pococí, Costa Rica. Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 3 p.
- Mulugo L, Birungi-Kyazze F, Kibwika P, Kikulwe E, Bonaventure-Omondi A and Ajambo S. 2020. Unravelling technology-acceptance factors influencing farmer use of banana tissue culture planting materials in Central Uganda. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 12(4), 453-465. <https://doi.org/10.1080/20421338.2019.1634900>
- Quiloango-Chimarro R, Gómez S, Viteri R, Suárez J. 2022. Typology of production units for improving banana agronomic management in Ecuador. *Agriculture*, 12(3), 163.
- Róling N. 1988. Extension Science Information Systems in Agricultural Development. Cambridge University. N.Y. Chapter 2. En antología Curso de Extensión Agrícola. Maestría en Extensión Agrícola con mención en Desarrollo Rural. Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 2006.

## CORBANA-COSTA RICA: 45 años de Investigación y Transferencia

Rafael A. Segura Mena<sup>1</sup>, Erick A. Bolaños Céspedes<sup>1\*</sup>, Marcial A. Chaverri Rojas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Corporación Bananera Nacional, CORBANA, Zapote, Costa Rica.

**\*Autor de correspondencia:**

Erick A. Bolaños Céspedes  
ebolanos@corbana.co.cr

**Contribución:**

Nota de Investigación

**Sección:**

Transferencia tecnológica

**Recibido:**

15 diciembre, 2025

**Publicado:**

30 abril, 2026

**Cita:**

Segura Mena RA, Bolaños Céspedes EA, Chaverri Rojas MA. 2026. CORBANA-COSTA RICA: 45 años de Investigación y Transferencia. *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 149  
<https://doi.org/10.62498/ARTC.26149>

### RESUMEN

La investigación científica, la innovación y la transferencia de tecnología estimulan el crecimiento productivo de los sistemas bananeros. Se describe el caso del ecosistema productivo de Costa Rica, el cual es un ejemplo de éxito de la Investigación, la Innovación y la Transferencia, por más de 45 años de creación de la Dirección de Investigaciones de CORBANA. La Dirección de Investigaciones de CORBANA fue creada en 1978 cuando la productividad estaba en menos de 2000 cajas ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Los primeros temas abordados fueron plagas y enfermedades. Otras prácticas desarrolladas son: El sistema de clasificación de suelos bananeros, el fraccionamiento de la fertilización, el uso de coberturas vegetales, el impacto de renovar las plantaciones, cosecha con tallo alto y mejoras en la nutrición, el conocimiento de los conceptos de sucesión de plantaciones, formas diferentes de aplicar insumos (fertilizante, nematicidas, fungicidas), arreglos de siembra más eficientes como los hexágonos y dobles hileras y el concepto de la calidad y salud de los suelos. La transferencia de los resultados de la investigación y la innovación ha permitido un crecimiento sostenido desde 1995 (final de la expansión bananera) en la productividad del país, solo afectada por fenómenos climáticos extremos y desbalances en los sistemas que fueron subsanados. A partir de 2020, la productividad promedio nacional superó las 3000 cajas ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> lo que demuestra el impacto positivo de la Investigación, la innovación y la transferencia realizada por CORBANA en más de 45 años sobre la productividad bananera de Costa Rica.

**Palabras clave:** Banano, Producción, Productividad, Sostenibilidad

### ABSTRACT

**CORBANA-COSTA RICA: 45 Years of Research and Extension:** Scientific research, innovation and technology transfer stimulate the productive growth of banana systems. The case of the productive ecosystem of Costa Rica is described. This is an example of success of Research, Innovation and Transfer, for more than 45 years from the creation of the CORBANA's Research Department. It was created in 1978 when productivity was less than 2000 boxes ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The first topics addressed focused on pests and diseases. Other developed practices are: The banana soil classification system, fractionation of fertilization, use of covers crops, the impact of renewing plantations, harvesting with tall stems and improvements in nutrition, knowledge of the concepts of plantation succession, different ways of applying inputs (fertilizer, nematicides, fungicides), more efficient planting arrangements such as hexagons and double rows and the concept of soil quality and health. The transfer of research and innovation results has allowed for sustained growth since 1995 (the end of the banana expansion) in the country's productivity, only affected by extreme weather events and imbalances in the systems that were corrected. As of 2020, the national average productivity exceeded 3000 boxes ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> which demonstrates the positive impact of the Research, innovation and transfer carried out by CORBANA in more than 45 years on the banana productivity of Costa Rica.

**Keywords:** Banana, Production, Productivity, Sustainability



## INTRODUCCIÓN

La investigación científica y la innovación estimulan el crecimiento productivo de los sistemas agrícolas. La transferencia de tecnología constituye un paso determinante entre la investigación y la implementación, es el eslabón entre la generación y la aplicación del conocimiento (Bolaños-Céspedes, 2008). En conjunto permiten establecer sistemas de producción adaptados a los cambios en ambiente, en la legislación, en las preferencias del consumidor y en las demandas sociales.

El sistema bananero costarricense un ejemplo exitoso. La implementación de resultados de la investigación con el desarrollo e implementación de prácticas más amigables es beneficiosa en el componente productivo y ambiental de los sistemas bananeros. No obstante, algunos factores como el incremento en el costo, la resistencia al cambio, el tiempo que toma encontrar, depurar e implementar nuevos resultados y los cambios ambientales, interfieren en el desarrollo de la investigación y la transferencia.

Las condiciones descritas y análisis de corto plazo pueden desestimular la inversión en la investigación y la extensión, por lo tanto, se limitaría la capacidad de aumento en la producción o la adaptabilidad de los sistemas productivos a cambios del ecosistema y de las preferencias de los mercados. Establecer los efectos positivos de la investigación y la transferencia sobre la producción y un menor impacto ambiental requiere medir el nivel productivo en un mayor periodo de tiempo y en una larga escala. Un análisis en función de la implementación de los resultados en periodos extensos del tiempo puede mostrar la viabilidad de la inversión en estos aspectos.

Medir la adopción es fundamental para evaluar el sistema de Investigación-Extensión. Determinar las causas de una alta o baja adopción es fundamental para implementar cambios tecnológicos cuantitativos en plazos determinados y realizar los ajustes correspondientes para que el sistema funcione adecuadamente (Röling, 1998).

El ecosistema bananero de Costa Rica es un ejemplo de éxito de la Investigación, la Innovación y la Transferencia, por más 45 de años de creación de las unidades técnicas de CORBANA; la Dirección de Investigaciones y la Dirección de Asistencia Técnica. Mediante una alianza público-privada de conformación CORBANA ha desarrollado investigación científica en el cultivo del banano (*Musa AAA*) para exportación. Los resultados son puestos al servicio del empresario bananero costarricense y han permitido aumento en la producción y la competitividad del sector. No obstante, el impacto de la investigación y la transferencia puede minorizarse ante un panorama de alta producción constante.

El presente artículo tiene como objetivo demostrar el impacto positivo de la Dirección de Investigaciones y de la Dirección de Asistencia Técnica de CORBANA en el ecosistema bananero costarricense a través de 45. Realiza un análisis descriptivo y cronológico de prácticas, tecnologías y conocimiento (hitos) y su relación con la productividad promedio (cajas exportadas ha<sup>-1</sup>) en intervalos de tiempo de 5 años (quinquenios). Se consideran aspectos de dinámica del sector y el componente de posible impacto de condiciones de clima en los años analizados.

### **Creación de investigaciones y asistencia técnica**

La Dirección de Investigaciones de CORBANA fue creada en 1978, siete años después de la fundación de CORBANA (ASBANA, como se llamó originalmente). El objetivo fue (es) desarrollar nuevas alternativas para la producción sostenible del cultivo de banano. El desarrollo de paquetes de manejo en plagas de la raíz (nematodos) y del follaje (Sigatoka negra) fueron las primeras acciones. La generación y el acceso a nueva información técnica y a la innovación para el productor costarricense eran limitada (ASBANA, 1978). La productividad costarricense se mantenía en un promedio cercano (por debajo) de las 2000 cajas (18,14 kg c/u) ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (CORBANA, 1992).

Asimismo, dentro de las acciones están el coordinar con instituciones tanto nacionales como internacional esfuerzos para acelerar el desarrollo de la investigación en banano (ASBANA, 1978). Se buscó mejorar y mantener la cantidad y la calidad de la producción bananera nacional para cumplir los requerimientos de los mercados internacionales. Estas acciones se consolidaron con la creación de la Dirección de Asistencia Técnica en 2003, lo cual articuló mejor la transferencia de los resultados de la investigación.

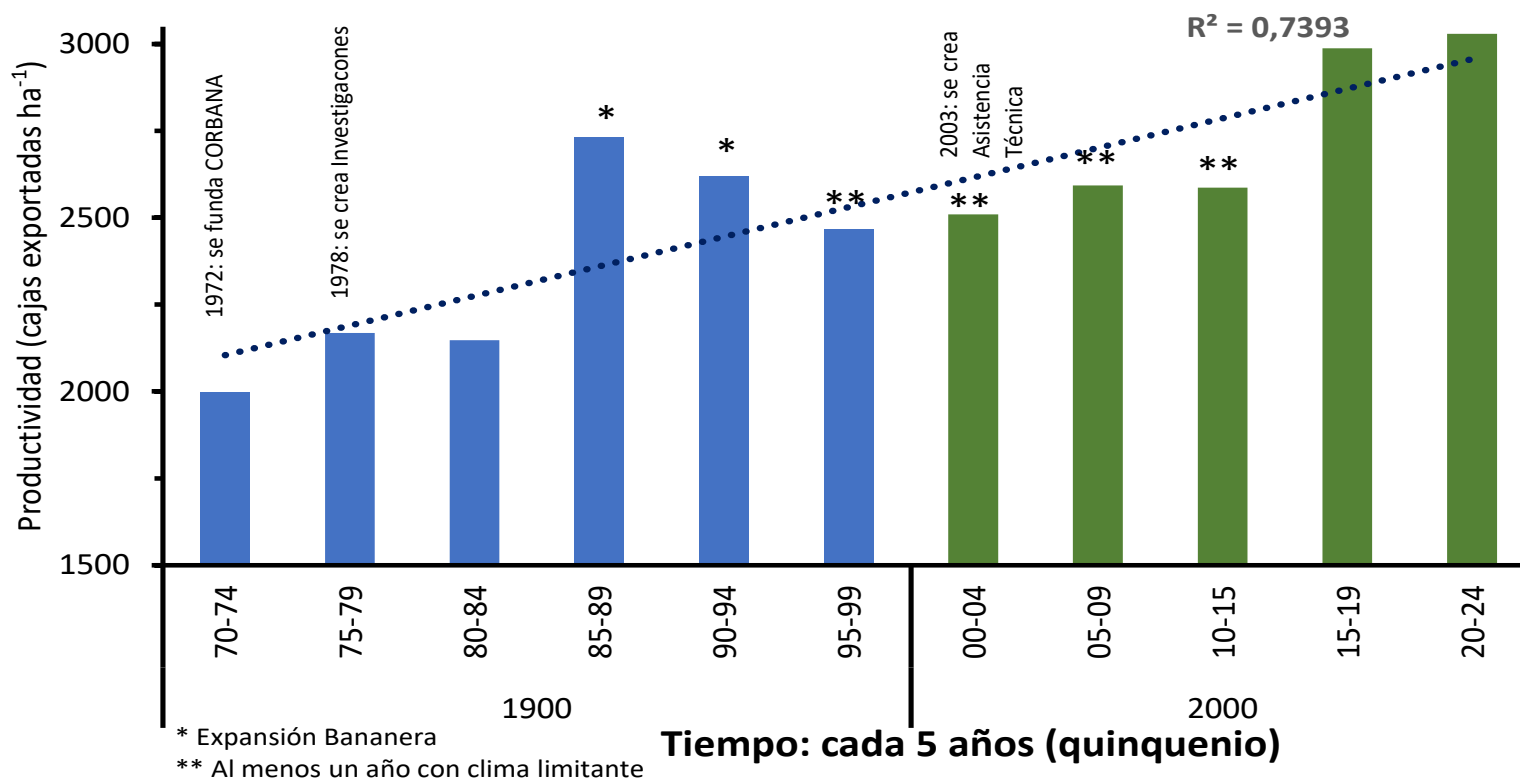
### **Investigación, transferencia y producción**

La Figura 1 presenta la productividad (cajas exportadas ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) en Costa Rica en intervalos de tiempo de cada 5 años (quinquenios) entre 1970 y 2024. Se observa una alta correlación ( $R=0,74$ ) entre la implementación de los resultados de la investigación y el aumento de la productividad en el tiempo. La Dirección de Investigaciones inició en aspectos de manejo de plagas como los nematodos (ASBANA, 1979; Murray, 1980) y el manejo de enfermedades como principalmente la Sigatoka Negra (Gonzales y Jaramillo, 1979; Jaramillo 1979). Temas como factores que afectan la incidencia de la Sigatoka fueron analizados (Rodríguez, 1982) y el establecimiento de sistemas de pronóstico de la sanidad radical fueron desarrollados (Figuerola, 1985).

En el primer quinquenio de los 1980's otras áreas técnicas de la investigación inician su desarrollo. El sistema de clasificación de suelos (ASBANA, 1978), fue un avance de importancia considerando el inicio del programa de expansión bananera, mediante el cual se duplicó el área de producción en el país (Bolaños, 1991). Esto causó un aumento mayor en el promedio de exportaciones en el segundo quinquenio de esta década donde se alcanzó una productividad de 2731 caja ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Otras prácticas de impacto que se desarrollaron, y que pueden ser listadas fueron el concepto de nutrición del cultivo (López, 1983) y el fraccionamiento de la fertilización, practica que aumenta la eficiencia en el uso de los fertilizantes (Flores y López, 1992), el concepto de micropropagación (Sandoval, 1985), diferentes sistemas de siembra de las plantaciones con mayores densidades (ASBANA, 1977; Garita, 1979), lo cual aumenta productividad, la cosecha con el tallo alto, como alternativa para recircular agua y nutrientes en la planta de banano (Araya y Vargas, 2000).

Al inicio de la década de los 1990 's se crea la Comisión Ambiental Bananera (CAB) como un compromiso del sector y del país de una producción más sostenible y ambientalmente responsable (ASBANA, Rojas, 1992). El primer quinquenio de los 90's se estabiliza la productividad después de la expansión bananera. Otros desarrollos tecnológicos, de conocimiento e innovación transferidos en los 90's y 2000 tienen que ver con el concepto de calidad y salud de suelos bananeros y su relación con la producción (Segura *et al*, 2015). En este tema, aspectos como la corrección del pH y la acidez de suelos, la conservación y recuperación de los suelos mediante el uso de coberturas vegetales (Valverde *et al.*, 2023). Se desarrollan e implementan además sistemas de selección de la sucesión (deshija temprana), así como el inicio de investigación en control biológico y biología molecular.

El componente microbiológico y su relación con la producción permitieron ampliar el conocimiento y desarrollar sistemas de manejo más integrales del suelo, la sanidad radical y la nutrición del cultivo. La productividad promedio subió (y se mantuvo entre los quinquenios 1995-1999, 2000-2004, 2005-2009 y 2010-2015) a 2500 caja ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, lo que permitió una mayor competitividad del sector, a pesar de que entre 1993 y 2001 se dio el fenómeno de mercado conocido como "La Guerra del Banano" lo cual limitó transitoriamente el acceso a los mercados de consumo (Bhala, 2000). Asimismo, estos mismos periodos tuvieron, cada uno, la influencia negativa en al menos uno de los años de condiciones extremas de clima, particularmente con altas precipitaciones que afectaron la respuesta productiva y que ha incrementó la agresividad de las plagas y enfermedades como los nematodos, la Sigatoka negra y plagas insectiles. Esto demuestra las fortalezas de la investigación, la innovación y la transferencia para sobrellevar y superar los momentos de crisis.



**Figura 1.** Productividad (cajas exportadas ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) en Costa Rica desde la fundación de CORBANA (1972) y creación de la Dirección de Investigaciones (1978) y Asistencia Técnica (2003) hasta el año 2024. (Fuente: CORBANA 2001, 2004, 2009, 2011, 2016, 2020, 2025).

Entre el 2010 y hasta 2024, se da un crecimiento consistente en la productividad, La Dirección de Asistencia Técnica elabora un manual con buenas prácticas agrícolas (Bolaños *et al.*, 2011). Además de trabaja el concepto de integración de prácticas convencionales y alternativas con demostrada eficacia sobre la mayor producción. Se desarrolla el primer formulado de control biológico a partir de organismos nativos de plantaciones bananeras, se implementa la radiografía de poblaciones como herramienta de diagnóstico y mejora y se inician investigaciones en búsqueda de resistencia a la Fusariosis del banano por *Fusarium Raza 4 Tropical* mediante métodos convencionales. El nivel de adopción de prácticas transferidas ha estado por encima del 60 % (Bolaños, 2025, comunicación personal). La productividad del país supero las 3 000 cajas/ha/año a partir del 2020 (CORBANA, 2025) y se ha mantenido en rangos por encima de este valor.

La constante interacción de los investigadores y los extensionistas con los empresarios ha permitido establecer, mediante encuestas, auditorias y entrevistas, la agenda científica del Centro de Investigaciones, con base en las principales necesidades que enfrenta el sector. Esto además ha llevado evolucionar las líneas de investigación desde los inicios de la gestión donde los problemas que se enfrentaron estaban más ligados a generar conocimiento básico en cada disciplina de estudio (suelo, plagas, enfermedades, agronomía) a problemas más complejos y multifactoriales, así como temas de clima, de ambiente, de implementación tecnológica (automatización) y de calidad de la producción como los es la actualidad.

## CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación, la innovación y la transferencia que se realiza CORBANA han impactado de manera positiva la productividad bananera costarricense. Esto representa un beneficio económico, pero también ha permitido asegurar la sostenibilidad de un sector con un alto beneficio para la sociedad costarricense. Las practicas, tecnologías y conocimientos generados permiten una producción creciente, con un alto componente de responsabilidad y sostenibilidad tanto social como ambiental, manteniendo y mejorando la calidad del banano de Costa Rica, sin la necesidad de aumentar el área de producción.

Este tipo de análisis sobre los resultados de la Investigación, la innovación y la trasferencia requieren de horizontes de tiempo mayores, donde los efectos sean acumulados y puedan se cuantificados considerando un mayor número de variables tanto bióticas como abióticas (ambientales) que pueden afectar la producción en el tiempo. En el caso particular de Costa Rica, se demuestra que lo invertido ha rendido un retorno positivo a lo largo del periodo evaluado.

## REFERENCIAS

- ASBANA. 1977. La siembra a surco doble: novedad en el cultivo de banano. ASBANA 1(2):5.
- ASBANA. 1979. Seminario: consideraciones sobre los problemas ocasionados por nematodos en banano. ASBANA 3(8):13-14.
- ASBANA. 1992. Principios y metas del manejo ambiental en la actividad bananera. CORBANA 16(38):7-8.
- Araya M y Vargas A. 2000. Efecto de la altura del corte del pseudotallo de la panta recién cosechada de banano (*Musa* AAA, cv. 'Gran Enano') y de la altura del hijo de sucesión sobre la producción. CORBANA 26(53): 35-46.
- ASBANA. 1978. Inicia actividades el Departamento de Investigación. ASBANA n° 3, Año 7, pp 15.
- Bhala Raj. 2000. The Bananas War, McGeorge L. Rev. 31: 839.
- Bolaños E. 1991. Alcances del Plan de Restitución de Áreas. CORBANA 15 (35) 11-12.
- Bolaños E, *et al.* 2011. Manual de buenas prácticas agrícolas en el cultivo del banano. CORBANA. 176 pp.
- Bolaños-Céspedes E. 2008. Análisis del servicio de asistencia técnica de CORBANA S.A. Lineamientos para su mejoramiento. Tesis Máster en Ciencias. Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica. 147 p.
- CORBANA. 1992. Informe Estadístico de Exportaciones Bananeras 1970-1991. San José, Costa Rica, 35 pp.
- CORBANA. 2009. Informe Estadístico de Exportaciones Bananeras 1970-2000. CORBANA, 18 pp.
- CORBANA. 2004. Estadísticas de Exportación Bananera 2003. CORBANA, 58 pp.
- CORBANA. 2009. Estadísticas de Exportación Bananera 2008. CORBANA, 77 pp.
- CORBANA. 2011. Estadísticas de Exportación Bananera 2010. CORBANA, 73 pp.
- CORBANA. 2015. Estadísticas de Exportación Bananera 2014. CORBANA, 83 pp.
- CORBANA. 2019. Estadísticas de Exportación Bananera 2018. CORBANA, 77 pp.
- CORBANA. 2025. Estadísticas de Exportación Bananera 2024. CORBANA, 44 pp.
- Figueroa A. 1985. Sistema de pronóstico y advertencia en el control de nemátodos en banano. CORBANA 16(37):22-26.
- Flores CL y López A. 1992. Métodos de colocación del fertilizante en el cultivo de banano. ASBANA 9(23):10-13.
- Garita HJ. 1979. Innovamos en cuanto al método de siembra. ASBANA 6(20):10-11.
- Gonzalez PM y Jaramillo R. 1979. Sigatoka Negra. Enfermedad de la Sigatoka negra (*Micosphaerella fijiensis*) morelet var. DIFFORMIS Mulder & Stover). ASBANA 3(10):7-9.
- Jaramillo R. 1979. Comentarios sobre la aparición de la Sigatoka Negra. ASBANA 3(10):2.
- López GCA. 1983. Aplicación del análisis químico del suelo y de la planta en el banano. Diagnóstico del estado nutricional de plantaciones bananera. ASBANA 6(19):1,13-16,18.
- Murray D. 1980. Uso de nematicidas en escala comercial en plantaciones de banano. ASBANA 4(13):8-9,16.
- Rodriguez MRA. 1982. Por varios factores aumenta la incidencia de Sigatoka negra en la Zona Atlántica. ASBANA 4(11):3-4, 6-7.

- 
- Röling N. 1988. Extension Science Information Systems in Agricultural Development. Cambridge University. N.Y. Chapter 2. En antología Curso de Extensión Agrícola. Maestría en Extensión Agrícola con mención en Desarrollo Rural. Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 2006.
- Rojas RG. 1992. El ambiente y el cultivo de banano. CORBANA 16(37):2.
- Sandoval JA. 1985. Micropropagación de musáceas. ASBANA 9(24): 21-23.
- Segura R, Serrano E, Pocasangre L, *et al.* 2015. Chemical and microbiological interactions between soils and roots in commercial banana plantations (*Musa* AAA, cv. Cavendish). *Scientia Horticulturae* 197:66–71.
- Valverde E, Ortega R, González M, *et al.* 2023. Coberturas vivas para recuperar y mantener la calidad y la salud del suelo en la producción de banano (*Musa* AAA). *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 1(1): 14

# La conquista digital del banano latinoamericano: un vuelo entre la innovación de la inteligencia artificial y el laberinto jurídico. ¿preparada la región para el futuro?

MSc. Yelena Piedra Matsenko<sup>1</sup>

Asesora Legal del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE). Integrante de la Comisión de Compliance (Cumplimiento Normativo) del Colegio de Abogados y Abogadas de Costa Rica. Congresista a nivel internacional y nacional, escritora de libros y diversos artículos académicos a nivel nacional e internacional. M.Sc. en Derecho Penal Económico, Universidad de La Rioja, España. Compliance Penal Officer, World Compliance Association. Ex alumni de la Unión Internacional del Notariado. Especialista en Asesoría Tributaria, Universidad FUNDEPOS. Especialista en Derecho Notarial y Registral, Universidad FIDELITAS y Licenciada en Derecho. Profesora sustituta en varias Universidades Privadas de Costa Rica.

\*Autor de correspondencia:  
Yelena Piedra Matsenko  
ypmstudiojuridico@gmail.com

**Contribución:**  
Carta al Editor

**Sección:**  
Otros: Inteligencia Artificial

**Recibido:**  
15 diciembre, 2025

**Publicado:**  
30 abril, 2026

**Cita:**  
Piedra Matsenko Y. 2026. La conquista digital del banano latinoamericano: un vuelo entre la innovación de la inteligencia artificial y el laberinto jurídico. ¿preparada la región para el futuro? *Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia* 3(1): 150 <https://doi.org/10.62498/ARTC.26150>

## RESUMEN

El sector bananero latinoamericano enfrenta desafíos existenciales. La Inteligencia Artificial (IA) y la robótica son cruciales para su sostenibilidad, pero Costa Rica sufre una obsolescencia legal que genera incertidumbre jurídica. Este ensayo revela vacíos en derecho laboral, tributario, responsabilidad civil/penal, gobernanza de datos y marcos ambiental/corporativo/agrario, evidenciando cómo la inacción frena la inversión y la competitividad. Para mitigar estos riesgos, es esencial un programa de *Compliance* robusto. Se proponen mecanismos para una reforma legal integral que posicione a Costa Rica como líder regional, fomentando una adopción ética y responsable de la IA que impulse la prosperidad y la justicia en la agricultura.

**Palabras clave:** Inteligencia artificial, Sector bananero, Obsolescencia legal, Compliance, Costa Rica

## ABSTRACT

The Latin American banana sector faces existential challenges. Artificial Intelligence (AI) and robotics are crucial for its sustainability, but Costa Rica suffers from legal obsolescence that generates legal uncertainty. This essay reveals gaps in labor law, tax law, civil/criminal liability, data governance, and environmental/corporate/agrarian frameworks, demonstrating how inaction hinders investment and competitiveness. To mitigate these risks, a robust Compliance program is essential. Mechanisms are proposed for a comprehensive legal reform that positions Costa Rica as a regional leader, fostering an ethical and responsible adoption of AI that drives prosperity and justice in agriculture.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Banana sector, Legal obsolescence, Compliance, Costa Rica



## INTRODUCCIÓN

El banano es un pilar innegable de la economía costarricense, generando más de \$1.2 mil millones en exportaciones<sup>1</sup> y empleando a decenas de miles de personas<sup>2</sup>. No obstante, este sector vital, y, de hecho, el sector bananero de toda América Latina enfrenta amenazas existenciales como el agresivo *Fusarium Raza 4 Tropical (TR4)*<sup>3</sup>, el aumento de costos operativos, y la creciente imprevisibilidad del cambio climático<sup>4</sup>. Ante esta apremiante realidad, la Inteligencia Artificial (IA) y la robótica no son un lujo, sino una necesidad imperante. Se consolidan como herramientas concretas y accesibles, prometiendo potenciar el conocimiento agrícola y ofrecer soluciones tangibles para la supervivencia y sostenibilidad del sector.<sup>5</sup>

La paradoja, sin embargo, radica en que esta prometedora incursión tecnológica se encuentra con un desafío crítico e ineludible: las leyes actuales costarricenses están obsoletas y presentan vacíos legales significativos. El marco jurídico existente, concebido en una era predigital, lamentablemente no contempla las complejidades inherentes a estas tecnologías disruptivas, generando una profunda incertidumbre jurídica. Esta realidad no es exclusiva de Costa Rica; las similitudes en la obsolescencia de nuestros marcos jurídicos regionales representan un obstáculo común y crítico para la modernización de la agricultura en toda América Latina, acentuando la brecha para los pequeños y medianos productores.

Estos vacíos y la obsolescencia normativa costarricense se manifiestan de forma preocupante en áreas fundamentales, generando una parálisis legal que se traduce directamente en mayores costos de operación, primas de seguro incalculables, y una

---

<sup>1</sup> PROCOMER (Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica). 2024. Estadísticas de Exportaciones Agrícolas. San José, Costa Rica. Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: Procomer - Exportar desde Costa Rica

<sup>2</sup> MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica). 2023. Boletín Estadístico Agropecuario Serie Cronológica 2020-2023. Edición No.34 Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: Boletín Estadístico Agropecuario N°34

<sup>3</sup> Orr R and Nelson PN. 2021. *Eucalyptus cloeziana* mulch suppresses *Fusarium* wilt of banana. *Crop Protection* 147:105694. Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: *Eucalyptus cloeziana* mulch suppresses *Fusarium* wilt of banana - ScienceDirect

<sup>4</sup> FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2022. La digitalización de la agricultura: Tendencias, desafíos y oportunidades en América Latina y el Caribe. Roma, Italia. Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ed1c25f3-d755-4e8d-9ffc-75b01d09fbd2/content/sofa-2022/digital>

<sup>5</sup> Rodríguez DSL, Borém A, Vilela RMG. (Editores técnicos). 2021. *Banana: do plantio à colheita*. Livro. EPAMIG. Belo Horizonte, Brasil. 376 p.

fuga silenciosa de capital hacia jurisdicciones con marcos más previsibles, comprometiendo la viabilidad a largo plazo de nuestras fincas bananeras costarricenses. La ausencia de un marco claro sobre cómo estas tecnologías deben ser reguladas para asegurar una transición inclusiva y equitativa, especialmente para el pequeño productor, es un riesgo real.

El hipotético caso de "SmartBanano YPM S.A." es una empresa bananera costarricense que decide dar un salto tecnológico significativo. Para optimizar sus operaciones, invierte fuertemente en herramientas de vanguardia: drones autónomos, robots cosechadores y una sofisticada plataforma de inteligencia artificial (IA). Sirve como una vívida ilustración de la urgencia y la necesidad imperante de implementar un programa de *Compliance* (cumplimiento normativo) que sea robusto e integral. Este programa no solo debe abarcar las dimensiones ética y penal, sino también, de manera crucial en este contexto, la agraria.

Sin embargo, esta avanzada incursión tecnológica no está exenta de riesgos. En "SmartBanano YPM S.A.", un sesgo algorítmico en la gestión de personal lleva a recomendaciones discriminatorias, mientras que un ciberataque a la red permite la manipulación de drones para causar daño ambiental y pérdidas económicas por cosecha prematura. Además, una nueva ley de agroquímicos, sin considerar la tecnología de precisión, frena la eficiencia. Este caso unificado expone la colisión entre la tecnología y los vacíos legales en materia laboral, de responsabilidad, gobernanza de datos, ciberseguridad, y derecho ambiental y agrario en Costa Rica.

El presente ensayo tiene como objetivos:

Analizar los principales vacíos legales y desafíos jurídicos que la implementación de la Inteligencia Artificial (IA) y la robótica plantea al marco legal costarricense, con relevancia regional.

Identificar las implicaciones de esta obsolescencia normativa, incluyendo la necesidad de un programa de *Compliance*, en ámbitos clave como el Derecho Laboral, Tributario, Civil, Penal, Ambiental, Corporativo y Agrario.

Proponer líneas de acción y mecanismos regulatorios para una integración ética y responsable de la IA en el sector bananero latinoamericano, buscando asegurar la seguridad jurídica y fomentar la inversión sostenible.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El presente trabajo se fundamenta en un análisis jurídico-doctrinal y comparativo de la normativa vigente en Costa Rica, con especial énfasis en el Código de Trabajo

(Ley N° 2), el Código de Normas y Procedimientos Tributarios (Ley N° 4755), la Ley del Impuesto sobre la Renta (Ley N° 7092), el Código Civil (Ley N° 30), el Código Penal (Ley N° 4573), la Ley de Protección de la Persona frente al Tratamiento de sus Datos Personales (Ley N° 8968), la Ley de Fortalecimiento de la Ciberseguridad (Ley N° 9694), la Ley Orgánica del Ambiente (Ley N° 7554), el Código de Comercio (Ley N° 3284), y la Ley General de la Administración Pública (Ley N° 6227).

Se realizó una revisión exhaustiva de literatura especializada en Derecho de la IA, ética algorítmica y tributación de la economía digital. Esto incluyó informes de organismos internacionales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos<sup>6</sup>, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura<sup>7</sup> y la Unión Europea<sup>8</sup>. La problemática fue ilustrada mediante un caso hipotético unificado ("SmartBanano YPM S.A."), diseñado para evidenciar la colisión entre la tecnología de IA y los vacíos normativos en el sector bananero. El análisis se organizó por temas, explorando los retos específicos que presentan las diferentes áreas del Derecho. Además, se incluyó una discusión sobre cómo estos vacíos legales impactan a nivel regional. La investigación se centró en la identificación de principios jurídicos vulnerados y la propuesta de mecanismos de reforma regulatoria. Las abreviaturas del sistema métrico decimal no son aplicables a este tipo de estudio jurídico-analítico.

## RESULTADOS

La transformación digital del sector bananero costarricense, aunque prometedora, se ve gravemente obstaculizada por un marco jurídico desfasado. La obsolescencia de nuestras leyes y la existencia de vacíos normativos en áreas críticas no solo generan incertidumbre, sino que chocan directamente con principios jurídicos fundamentales y compromisos internacionales asumidos por Costa Rica.

---

<sup>6</sup>OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2019. Principios de la OCDE sobre la Inteligencia Artificial. París, Francia. Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: [AI principles | OECD](#)

<sup>7</sup> UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2021. Recomendación sobre la Ética de la Inteligencia Artificial. París, Francia. Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: [unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137\\_spa/PDF/381137spa.pdf.multi](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137_spa/PDF/381137spa.pdf.multi)

<sup>8</sup> EU (Unión Europea). 2016. Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016, relativo a la protección de las<sup>2</sup> personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos (RGPD). Diario Oficial de la Unión Europea L 119. Accesible en: [Reglamento - 2016/679 - EN - GDPR - EUR-Lex](#)

## **Derecho Laboral: Código de Trabajo vs. Inteligencia Artificial (IA)**

El Código de Trabajo de Costa Rica (creado en 1943) tiene un objetivo claro: proteger al trabajador, que es la parte más débil en la relación con el jefe (patrono). Por eso, se basa en principios como la protección y la justicia social.

El problema es que el Código fue diseñado pensando en que todas las decisiones (contratar, ascender, despedir) las toma un ser humano con responsabilidad clara.

El Gran Vacío Legal: ¿Quién es el Jefe?: Hoy, algunas empresas usan "algoritmos" para tomar esas decisiones.

Imaginemos a "SmartBanano YPM S.A." donde un algoritmo decide despedir a trabajadores mayores de 50 años por "baja productividad". El Código de Trabajo no tiene una respuesta para esto. Aquí surge el vacío legal: ¿Quién es el responsable real de ese despido? ¿El programador que lo hizo, la empresa que lo usa, o la IA misma? Nuestro sistema legal no está preparado para asignar culpas a una máquina. Cuando un funcionario público toma una decisión, la Ley obliga a que sea transparente, y el ciudadano puede pedir explicaciones y objetar si hay abuso. En el sector privado, la IA también ejerce un poder al tomar decisiones (llamada "discrecionalidad algorítmica"). Pero, para el trabajador, no existen reglas claras ni herramientas para:

- Auditar: No se puede revisar si el algoritmo es justo o si tiene sesgos.
- Pedir Explicaciones: El trabajador no tiene cómo exigir una justificación clara de por qué la IA tomó esa decisión.

El uso de la Inteligencia Artificial (IA) en el trabajo sin una regulación adecuada pone en riesgo directo tres derechos fundamentales de los empleados:

**Afectación a la Igualdad y la No Discriminación.** El primer problema ocurre porque la IA aprende de datos históricos que muchas veces ya contienen prejuicios humanos. Cuando el algoritmo se utiliza, puede repetir o incluso aumentar esos sesgos. Ejemplo "SmartBanano": Si el algoritmo de la empresa decide despedir únicamente a personas mayores de 50 años, la IA está discriminando a este grupo. Aunque la empresa use tecnología, sigue siendo responsable de violar las leyes de igualdad.

**Desafío al Debido Proceso (Defensa).** El debido proceso garantiza que todo trabajador tiene derecho a saber "por qué" se tomó una decisión que le afecta. El problema es que muchos sistemas de IA son una "caja negra": no explican de forma sencilla cómo llegaron a su conclusión. Ejemplo SmartBanano: El trabajador despedido por la IA de SmartBanano no sabe cuál fue el motivo exacto de su despido, lo que le impide defenderse. Sin una explicación clara, el derecho a la defensa se vuelve inútil.

**Riesgo para la Privacidad.** Para poder funcionar y "medir la eficiencia", los sistemas de IA necesitan recopilar y analizar una gran cantidad de datos personales de los empleados. Ejemplo SmartBanano: Si no hay reglas estrictas sobre qué datos se recogen y cómo se usan, la IA puede convertir el lugar de trabajo en un monitoreo constante de los empleados, invadiendo su intimidad y privacidad sin consentimiento claro.

El sistema laboral costarricense fue creado para relaciones humanas, no para máquinas. Para proteger los derechos de las personas<sup>9</sup>, es urgente crear reglas que:

- Definan quién es responsable por una decisión de la IA.
- Obliguen a las empresas a dar explicaciones claras (Derecho a la Explicación).
- Permitan a un humano revisar cualquier decisión automatizada.
- Regulen el uso de los datos personales de los empleados.

### **Cumplimiento tributario y tecnología: el problema de cobrar impuestos en la era de la IA**

El sector bananero en Costa Rica está empezando a usar inteligencia artificial (IA) y robótica para producir más y mejor. Sin embargo, la ley tributaria costarricense no está preparada para este tipo de tecnología.

Esto genera incertidumbre: las empresas no saben cuánto tendrán que pagar en impuestos, y eso hace que muchas no quieran invertir en estas innovaciones.

Las leyes actuales —la Ley del Impuesto sobre la Renta y el Código de Normas y Procedimientos Tributarios— fueron pensadas para un mundo donde solo las personas y las empresas tradicionales generan ingresos, no máquinas autónomas o sistemas de IA<sup>10</sup>. Por eso, principios básicos como la claridad de la ley y la seguridad jurídica quedan afectados.

### **Principales Vacíos de la Ley Tributaria ante la Inteligencia Artificial (IA):**

**El desafío de atribuir la renta generada por la IA.** Uno de los vacíos fundamentales en la legislación actual es la dificultad para definir y atribuir la renta generada directamente por sistemas de Inteligencia Artificial y robótica. Si bien la ley establece

---

<sup>9</sup> Organización Internacional del Trabajo (OIT). 2025. La IA y la digitalización están transformando la seguridad y la salud en el trabajo. <https://www.ilo.org/es/resource/news/la-ia-y-la-digitalizacion-estan-transformando-la-seguridad-y-la-salud-en-el>

<sup>10</sup> Martínez C. 2021. Implicaciones Tributarias de la Automatización y la Renta de Sistemas Autónomos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Costa Rica. Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: DSpace: Inicio

que se debe pagar impuesto sobre la renta obtenida por actividades económicas, no ofrece claridad sobre a quién se le atribuye la ganancia cuando esta es producida u optimizada por un robot o una IA. Por ejemplo, si un software basado en IA aumenta significativamente la velocidad de cosecha o mejora la eficiencia de la irrigación, no existe un mecanismo claro para calcular y asignar ese ingreso adicional. Esta ambigüedad técnica y legal impide la correcta aplicación del impuesto sobre la renta en un entorno cada vez más automatizado.

**La obsolescencia acelerada y la depreciación de activos tecnológicos.** Otro problema significativo radica en la depreciación fiscal de robots y software de IA. Las reglas de la ley de renta están diseñadas para la depreciación de maquinaria y equipos tradicionales, con ciclos de vida relativamente lentos. Sin embargo, la naturaleza misma de la IA y la robótica implica una obsolescencia tecnológica muy rápida. Al no existir tablas de depreciación específicas o aceleradas para estas nuevas tecnologías, las empresas se ven obligadas a depreciar estos activos innovadores durante períodos más largos de lo que su vida útil real permite. Esto resulta en una carga impositiva más alta de lo que corresponde, lo cual actúa como un factor que desincentiva la inversión y la compra de tecnología avanzada.

**La indefinición fiscal de los bienes intangibles.** El valor de la Inteligencia Artificial reside en gran parte en sus activos intangibles, como el software, los algoritmos y los datos, en lugar de en bienes físicos tradicionales. La legislación vigente presenta grandes deficiencias al no explicar claramente cómo tratar fiscalmente estos bienes intangibles. Este vacío se manifiesta tanto en el desarrollo interno de tecnología de IA por parte de una empresa como en la compra de estos sistemas o licencias a proveedores extranjeros. La falta de un marco regulatorio específico para los intangibles tecnológicos añade una capa de incertidumbre al cálculo de los costos y los impuestos, complicando la contabilidad empresarial.

**Incertidumbre en las retenciones para servicios digitales<sup>11</sup>.** La Ley 9635, que regula la tributación de algunos servicios digitales, se orientó principalmente a los servicios dirigidos al consumidor final. Sin embargo, la expansión de la IA en el ámbito empresarial plantea un vacío normativo sobre los servicios digitales especializados, como el software de agricultura de precisión o la consultoría basada en algoritmos. Actualmente, no está claro si estos servicios deben estar sujetos a retención de renta, IVA o una combinación de ambos. Esta ambigüedad puede incluso conducir a

---

<sup>11</sup> García R. 2023. Tributación de activos digitales y robóticos en la economía agrícola. Artículo Científico. Revista de Derecho Financiero.

escenarios de doble imposición si no se coordina adecuadamente el marco legal nacional con los tratados internacionales de prevención de la doble imposición.

**El riesgo de quedar rezagado ante el contexto internacional.** El contexto internacional avanza más rápido que la legislación local en este tema. Organizaciones clave como la OCDE<sup>12</sup> están trabajando activamente en la creación de marcos tributarios para la economía digital. De hecho, varios países ya discuten ideas innovadoras, incluyendo la posible implementación de un “impuesto a los robots”. Si el país no logra definir rápidamente una posición fiscal clara y coherente sobre la tributación de la IA, se corre el riesgo de perder ingresos fiscales significativos o, por el contrario, que las empresas operen bajo reglas obsoletas, haciéndolas pagar más de la cuenta y afectando su competitividad global.

**Las consecuencias críticas de la inacción regulatoria<sup>13</sup>.** El costo de no actualizar las reglas tributarias es alto y recae directamente sobre la economía y la competitividad. Si el país se mantiene inactivo, las empresas enfrentarán una gran incertidumbre sobre sus obligaciones fiscales, lo que inevitablemente frenará la inversión en tecnología. El aumento de los costos de producción derivado de las ineficiencias fiscales y la falta de claridad legal incentivará a muchas compañías a invertir en otros países con marcos regulatorios más definidos. Esto impactaría negativamente en sectores clave, como el bananero, poniendo en riesgo su crecimiento a largo plazo y la posición competitiva del país en el mercado global<sup>14</sup>.

### **Responsabilidad Civil y Penal: La desafiante atribución de culpa en la era de la autonomía**

La llegada de la inteligencia artificial y la robótica ha complicado de forma importante la forma en que se asigna la culpa cuando ocurre un daño. Las leyes costarricenses fueron creadas pensando en personas que actúan con intención o negligencia, no en máquinas que toman decisiones por sí mismas. Por eso, cuando un sistema autónomo causa un daño, hoy existe una enorme incertidumbre jurídica que afecta la seguridad jurídica y el acceso a la justicia.

---

<sup>12</sup> *Ibíd.*

<sup>13</sup> Martínez C. 2021. Implicaciones Tributarias de la Automatización y la Renta de Sistemas Autónomos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Costa Rica. Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: DSpace: Inicio

<sup>14</sup> Kim Y. 2019. Robot Tax: Economic Rationale and Policy Implications. *Journal of Tax Policy*.

En materia civil<sup>15</sup>, el Código Civil establece que quien cause un daño debe repararlo. Sin embargo, esta regla funciona solo cuando existe una persona claramente responsable. Si un dron de fumigación se desvía y provoca un daño ambiental, surge el dilema: ¿la culpa es del programador, del fabricante, del operador o de la empresa que lo utiliza? La ley no contempla daños causados por sistemas autónomos, ni define un tipo de responsabilidad especial por riesgos tecnológicos. Además, muchos algoritmos funcionan como una “caja negra”, lo que dificulta saber qué decisión tomó la IA y por qué, complicando la tarea de demostrar la relación entre la acción del sistema y el daño causado.

En el ámbito penal<sup>16</sup>, el problema es aún más evidente. El Derecho Penal costarricense exige que la culpa recaiga en una persona física o jurídica, no en un algoritmo. Por eso, no es posible atribuir responsabilidad penal directa a una IA. Aunque existen normas sobre delitos informáticos, estas no cubren situaciones como ataques o manipulaciones que afecten sistemas autónomos agrícolas, ni daños generados por fallos propios de la tecnología. Tampoco existe una regulación clara sobre la responsabilidad penal de empresas cuando los daños provienen del funcionamiento autónomo de sus sistemas tecnológicos.

El sector asegurador enfrenta un desafío similar. Los riesgos causados por IA o robótica son difíciles de predecir y de medir, lo que complica la creación de seguros adecuados. Si un dron autónomo causa un accidente o si un algoritmo falla y perjudica una cosecha, no está claro cómo deben cubrirse esos daños ni quién debe asumirlos. Esta falta de cobertura deja a las víctimas sin protección y obliga a los productores a asumir riesgos económicos muy altos, lo que a su vez desincentiva la inversión en nuevas tecnologías.

En resumen, las leyes actuales no están preparadas para regular daños causados por sistemas autónomos de inteligencia artificial. Es urgente establecer normas que definan con claridad quién es responsable, qué tipo de responsabilidad se aplica y cómo deben asegurarse estos riesgos. Sin estas reformas, la IA seguirá operando en un vacío legal que afecta la protección de los derechos, genera inseguridad jurídica y frena el avance tecnológico en sectores clave como el bananero.

---

<sup>15</sup> Solís M. 2023. Responsabilidad civil por daños causados por sistemas autónomos en Costa Rica. Artículo Científico. Revista de Derecho Privado.

<sup>16</sup> Hernández L. 2022. Cibercrimitos y Seguridad en Infraestructuras Agrícolas Inteligentes. Artículo Científico. Revista Iberoamericana de Derecho Penal.

## **Gobernanza de datos y ciberseguridad: vulnerabilidades de la agricultura inteligente y el control de los datos agrícolas**

A esto se suma que Costa Rica no tiene ninguna categoría legal que reconozca los datos agrícolas como información “estratégica” o “sensible”. En una finca inteligente, se generan datos sobre la salud de las plantas, las rutas de cosecha, los niveles de humedad o el uso de recursos. Toda esta información es valiosa porque permite predecir rendimientos, optimizar procesos y mantener la competitividad del sector. Sin embargo, hoy estos datos no tienen protección especial en la ley.

Esta falta de regulación queda en evidencia en el caso hipotético de SmartBanano YPM S.A., <sup>17</sup> donde un grupo externo logró acceder ilegalmente a los sistemas de la finca y robó información clave, incluyendo datos de maduración, eficiencia de recursos y patrones de producción. Estos datos luego fueron utilizados para manipular la operación de los drones y alterar el proceso productivo<sup>18</sup>. El incidente demuestra que los datos agrícolas pueden convertirse en un objetivo real para ataques que buscan ventaja económica, sabotaje o extorsión. Sin reglas claras sobre propiedad, uso y protección, la información queda expuesta a robo, manipulación o explotación sin que exista una consecuencia jurídica bien definida para los responsables.

En cuanto a ciberseguridad, la Ley 9694 representa un avance general, pero no responde a las necesidades de un sector agrícola cada vez más automatizado. Aunque el banano forma parte de la infraestructura crítica nacional, la normativa no define estándares mínimos para proteger sistemas autónomos, no exige auditorías periódicas ni establece protocolos obligatorios para reaccionar ante una brecha de seguridad. El ataque sufrido por SmartBanano YPM S.A., que permitió manipular drones y alterar datos de producción, demostró que las fincas inteligentes son vulnerables a “ciberataques agrícolas” capaces de afectar la producción, la cadena de suministro y, eventualmente, la seguridad alimentaria del país.

Además, la manipulación maliciosa de datos agrícolas no está tipificada como un ciberdelito específico, por lo que este tipo de conductas queda en un vacío legal. Esto implica que delitos modernos, que generan daños económicos graves y comprometen la estabilidad productiva, no tienen una respuesta penal adecuada.

---

<sup>17</sup> FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2022. La digitalización de la agricultura: Tendencias, desafíos y oportunidades en América Latina y el Caribe. Roma, Italia. Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ed1c25f3-d755-4e8d-9ffc-75b01d09fbd2/content/sofa-2022/digital>

<sup>18</sup> Ramírez S. 2023. Gobernanza de datos no personales en la agricultura: desafíos y propuestas legales. Artículo Científico. Revista Latinoamericana de Derecho Digital.

## **Derecho ambiental, corporativo y agrario: el reto de regular la agricultura con IA y robots**

La llegada de la inteligencia artificial y la robótica está cambiando por completo la forma en que se trabaja en la agricultura y en las empresas del sector. Sin embargo, nuestras leyes ambientales, corporativas y agrarias fueron creadas para un mundo distinto, y hoy no logran cubrir los retos que trae esta nueva realidad tecnológica. Esto genera incertidumbre y también limita la innovación.

En materia ambiental, la Ley Orgánica del Ambiente, N° 7554 establece principios claros de sostenibilidad y prevención del daño. Pero no existe una regulación específica para evaluar y controlar el impacto ambiental que pueden generar miles de drones y robots operando de forma continua. Estos equipos consumen energía, producen ruido y generan residuos tecnológicos que no están cubiertos por reglas claras de reciclaje o manejo adecuado.<sup>19</sup> Tampoco existe un sistema de responsabilidad extendida para fabricantes o importadores de equipos robóticos utilizados en la agricultura. Además, la normativa ambiental actual no distingue entre la fumigación tradicional y el uso de drones de precisión, lo cual puede llevar a decisiones regulatorias que frenan tecnologías más limpias y eficientes.

El marco de aviación tampoco está actualizado para esta realidad<sup>20</sup>. La ley principal es de 1972 y no contempla el uso de drones. Aunque existe un reglamento específico (RAC 09), este es demasiado general y no regula temas clave como el uso seguro de químicos, la certificación de drones agrícolas, las operaciones coordinadas de varios equipos (enjambres) o su integración con otras actividades agrícolas. Tampoco existe una normativa que defina cómo deben funcionar estos sistemas en el país. En pocas palabras, las reglas actuales no están hechas para la complejidad de los drones agrícolas modernos.

En el ámbito corporativo, surge otro desafío. Muchas decisiones empresariales —desde la logística hasta la planificación financiera— empiezan a ser tomadas o filtradas por sistemas de IA. Esto plantea preguntas nuevas: ¿cómo debe actuar una Junta Directiva si las decisiones clave vienen de un algoritmo?, ¿quién es responsable

---

<sup>19</sup> UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2021. Gestión de Residuos Electrónicos: Un desafío global. Nairobi, Kenia. Consultado el 09 de junio del 2025. Accesible en: <https://www.unep.org/resources/report/managing-e-waste-global-challenge> - Buscar con Google.

<sup>20</sup> Vega J. 2023. Regulación Ambiental y Precisión Agrícola: Un Análisis de los Drones en Costa Rica. Memorias de Congreso. Congreso Nacional de Derecho Ambiental.

si una decisión automatizada genera un daño o una pérdida? La normativa de gobierno corporativo no contempla la supervisión de sistemas de IA ni mecanismos para garantizar que la toma de decisiones digital sea ética, transparente y controlada.

En el derecho agrario también existen vacíos. Las leyes que regulan la producción, el uso del suelo y las relaciones entre fincas y comunidades fueron diseñadas para un modelo agrícola tradicional. En una finca totalmente automatizada, donde casi no se requiere intervención humana, cambian conceptos fundamentales: el empleo rural se reduce, la relación con el territorio se redefine y la función social de la propiedad adquiere un nuevo significado. Incluso surgen necesidades legales nuevas, como reconocer derechos sobre los datos del suelo, regular el acceso a terrenos que funcionan como infraestructura tecnológica o incorporar reglas para zonas donde operan vehículos autónomos y grandes redes de sensores.

En conjunto, estos vacíos legales no solo ralentizan la modernización del sector bananero, sino que pueden provocar problemas ambientales, sociales y económicos si no se actúa con antelación. Costa Rica necesita un marco legal moderno, coherente y bien integrado que permita aprovechar la eficiencia de la inteligencia artificial sin sacrificar la sostenibilidad, la equidad ni la seguridad del campo.

## CONCLUSIONES

El análisis presentado demuestra que, aunque la Inteligencia Artificial y la robótica ofrecen una oportunidad enorme para mejorar la sostenibilidad y competitividad del sector bananero en América Latina, las leyes costarricenses se han quedado atrás. Esto crea incertidumbre, frena la innovación y limita la capacidad del país para aprovechar estos avances. Los vacíos en áreas como el Derecho Laboral, tributario, responsabilidad civil y penal, protección de datos, y las normas ambientales, corporativas y agrarias muestran una falta de actualización que ni Costa Rica ni la región pueden permitirse.

Esta incertidumbre no solo detiene inversiones y nuevas tecnologías, sino que también pone en riesgo principios fundamentales de nuestra Constitución y compromisos internacionales. Vimos cómo la llamada “discrecionalidad algorítmica” pone en duda la protección de derechos laborales, como la no discriminación o el debido proceso. La falta de claridad fiscal sobre ingresos generados por sistemas autónomos o sobre la depreciación de activos robóticos afecta las decisiones de inversión. Asimismo, la ausencia de reglas claras sobre quién responde por daños causados por máquinas genera desprotección. La falta de regulación sobre la propiedad y seguridad de los datos agrícolas —esenciales para la soberanía alimentaria— nos deja

expuestos a ciberataques. Finalmente, la poca actualización de las normas ambientales, corporativas y agrarias impide que el sector agrícola se adapte adecuadamente a la digitalización.

El caso hipotético de “SmartBanano YPM S.A.” no es solo un ejercicio teórico: muestra claramente cómo estos vacíos legales pueden provocar crisis en múltiples áreas al mismo tiempo. Cuando la ley se queda atrás, la innovación se frena, aumentan los costos operativos, no existen seguros adecuados para los nuevos riesgos y el capital se va a otros países con reglas más claras. Todo esto puede poner en peligro la sostenibilidad futura de nuestras fincas.

Frente a este panorama, un sistema de *Compliance* integral no es solo una buena recomendación, sino una necesidad urgente. Este tipo de programa debe ir más allá de cumplir con la ley; debe ayudar a anticipar riesgos, actuar de forma ética y adaptarse rápidamente al avance tecnológico. En el sector bananero, un *Compliance* moderno debe cubrir:

- *Compliance* Laboral y de Derechos Humanos: Garantizar que los sistemas de IA usados para contratar, evaluar o despedir respeten la no discriminación, el debido proceso, la privacidad y que exista una explicación accesible de cómo decide cada algoritmo. También incluye auditorías para evitar sesgos.

- *Compliance* Tributario: Asegurar que se cumplan correctamente los impuestos asociados a la IA y la robótica, incluso con las dudas legales actuales. Esto implica manejar la tributación de ingresos generados por sistemas autónomos, definir cómo se deprecian los robots y las licencias de IA, y aplicar las retenciones correctas según los Convenios para Evitar la Doble Imposición.

- *Compliance* en Gobernanza de Datos y Ciberseguridad: Proteger datos personales y, sobre todo, datos agrícolas no personales, que hoy carecen de un marco claro de propiedad y uso. Además, se deben reforzar las medidas de ciberseguridad en infraestructura agrícola crítica e impulsar la sanción de ciberdelitos en el sector.

Definir protocolos para saber quién responde cuando un sistema autónomo causa daños, ya sea por fallas del software, por mala supervisión o por errores en la operación. También incluye prevenir y detectar ciberdelitos agrícolas.

- *Compliance* Ambiental: Asegurar que drones y robots cumplan con las normas ambientales, que los residuos electrónicos se gestionen adecuadamente y que las nuevas tecnologías permitan usar agroquímicos con mayor precisión y menor impacto ambiental.

- *Compliance* Corporativo y de Buen Gobierno: Adaptar la gobernanza empresarial para supervisar decisiones tomadas por IA, definir la responsabilidad de

los directores frente a los resultados de algoritmos e incorporar criterios éticos sobre el uso de la IA.

- *Compliance* Agrario: Adecuar las regulaciones a las nuevas dinámicas del campo automatizado, analizar el impacto en la función social de la propiedad y crear figuras legales que regulen el acceso a datos del suelo, redes de sensores y nueva infraestructura tecnológica.

Un sistema de *Compliance* robusto no es un gasto innecesario; es una inversión estratégica en la resiliencia, la transparencia, la reputación y la competitividad del sector bananero. Permite reducir riesgos, generar confianza y fortalecer relaciones con inversionistas, comunidades y consumidores. Una oportunidad para el liderazgo regional. Costa Rica tiene la posibilidad real de posicionarse como líder en Centroamérica y el Caribe si actúa de forma anticipada. Para ello, se deben tomar medidas concretas:

**Crear un marco legal moderno y flexible:** Regular la IA y la robótica con principios claros de responsabilidad, transparencia y propiedad de datos. Esto requiere equipos interdisciplinarios que elaboren leyes marco y actualicen normas sectoriales, además de mecanismos como “cajas de arena regulatorias” para probar tecnologías bajo supervisión.

**Proteger los derechos fundamentales:** Garantizar que la automatización no afecte la dignidad, igualdad, privacidad y debido proceso. También es necesario promover nuevos empleos relacionados con la tecnología, como operadores de drones o analistas de datos agrícolas.

**Impulsar la inversión responsable e incluir al pequeño productor:** Crear seguridad jurídica en materia fiscal y beneficios para que la tecnología llegue también a pequeños y medianos productores. Entre los incentivos recomendados se encuentran:

- Créditos fiscales por inversión tecnológica
- Exoneraciones de impuestos de importación
- Amortización acelerada de activos tecnológicos
- Deducciones por capacitación
- Incentivos a I+D (Investigación y Desarrollo) agrícola
- Reducción del impuesto sobre bienes inmuebles para fincas tecnológicas
- Fondos de capital para startups agrícolas

**Promover la sostenibilidad y la resiliencia:** Actualizar las normas ambientales y agrarias para integrar la IA en la gestión eficiente de recursos y en la protección de infraestructura crítica.

**Establecer un programa de *Compliance* integral:** Convertirlo en una guía para las empresas del sector, alineando la innovación con los derechos humanos, el ambiente, la seguridad y la ética.

Costa Rica tiene frente a sí una oportunidad histórica: crear un marco legal que convierta los riesgos de la IA en bases sólidas para una economía más próspera, justa y sostenible. Si se actúa con visión, el país puede asegurar que los beneficios tecnológicos lleguen por igual a grandes empresas y pequeños productores, fortaleciendo el futuro del sector bananero y de toda la economía nacional.

La pregunta final es simple, pero crucial: ¿estamos listos para asumir este liderazgo?

## REFERENCIAS

- Chacón M. 2023. Privacidad de Datos y Monitoreo Laboral en Costa Rica: Desafíos de la Inteligencia Artificial. Tesis de Licenciatura. Universidad de Costa Rica. Accesible en: <https://www.ts.ucr.ac.cr/>
- EU (Unión Europea). 2016. Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016, relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos (RGPD). Diario Oficial de la Unión Europea L 119. Accesible en: Reglamento - 2016/679 - EN - GDPR - EUR-Lex
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2022. La digitalización de la agricultura: Tendencias, desafíos y oportunidades en América Latina y el Caribe. Roma, Italia. Accesible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ed1c25f3-d755-4e8d-9ffc-75b01d09fbd2/content/sofa-2022/digital>
- García R. 2023. Tributación de Activos Digitales y Robóticos en la Economía Agrícola. Artículo Científico. Revista de Derecho Financiero.
- González A. 2022. Inteligencia Artificial y Derecho Laboral: Sesgos Algorítmicos en la Gestión de Recursos Humanos. Memorias de Congreso. Congreso Latinoamericano de Derecho del Trabajo.
- Hernández L. 2022. Cibercrimen y Seguridad en Infraestructuras Agrícolas Inteligentes. Artículo Científico. Revista Iberoamericana de Derecho Penal.
- Kim Y. 2019. Robot Tax: Economic Rationale and Policy Implications. Journal of Tax Policy.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica). 2023. Informe Anual del Sector Agrícola Costarricense. San José, Costa Rica.
- Martínez C. 2021. Implicaciones Tributarias de la Automatización y la Renta de Sistemas Autónomos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Costa Rica. Accesible en: DSpace: Inicio

- Mora F. 2022. Impacto de la Automatización Agrícola en el Régimen de Uso del Suelo y el Empleo Rural en Costa Rica. Artículo Científico. Revista de Derecho Agrario. Accesible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rda/article/view/51497> - Buscar con Google.
- OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2019. Principios de la OCDE sobre la Inteligencia Artificial. París, Francia.
- OIT (Organización Internacional del Trabajo). 2021. Tecnologías digitales y futuro del trabajo: Implicaciones para América Latina y el Caribe. Ginebra, Suiza.
- Orr R and Nelson PN. 2021. *Eucalyptus cloeziana* mulch suppresses Fusarium wilt of banana. Crop Protection 147:105694.
- PROCOMER (Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica). 2024. Estadísticas de Exportaciones Agrícolas. San José, Costa Rica.
- Ramírez S. 2023. Gobernanza de Datos No Personales en la Agricultura: Desafíos y Propuestas Legales. Artículo Científico. Revista Latinoamericana de Derecho Digital.
- Rodríguez DSL, Borém A, Vilela RMG. (Editores técnicos). 2021. Banana: do plantio à colheita. Livro. EPAMIG. Belo Horizonte, Brasil. 376 p.
- Solís M. 2023. Responsabilidad Civil por Daños Causados por Sistemas Autónomos en Costa Rica. Artículo Científico. Revista de Derecho Privado.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2021. Recomendación sobre la Ética de la Inteligencia Artificial. París, Francia.
- UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2021. Gestión de Residuos Electrónicos: Un desafío global. Nairobi, Kenia. Accesible en: <https://www.unep.org/resources/report/managing-e-waste-global-challenge> - Buscar con Google.
- Valverde P. 2023. Gobierno Corporativo en la Era de la IA: Adaptando Estructuras para Decisiones Algorítmicas. Artículo Científico. Revista de Derecho Empresarial.
- Vega J. 2023. Regulación Ambiental y Precisión Agrícola: Un Análisis de los Drones en Costa Rica. Memorias de Congreso. Congreso Nacional de Derecho Ambiental.