Acorbat Revista de Tecnología y Ciencia

De las ómicas al campo: inducción de defensa en banano frente a *Pseudocercospora fijiensis*

Héctor A. Rodríguez C.[1]*, Juan P. Ossa[2], Juan G. Morales[3], Wilmar A. Reyes[4]

[1]Profesor, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agronómicas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, [2]Investigador, Grupo de AgroBiotecnología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, [3]Profesor, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Agronómicas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, [4]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

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

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 1×10^6 conidios·mL^{-1}. 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 inoculo 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_2O_2 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 (A260/A280 = 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 ($|\log_2 FC| > 1$; $p \leq 0.05$) se identificaron con DESeq2. El análisis funcional se realizó con BinGO (FDR ≤ 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 ≥ 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 ± 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 necrotróficos y biotróficos. 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, β-1,3-glucanasas y β-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).

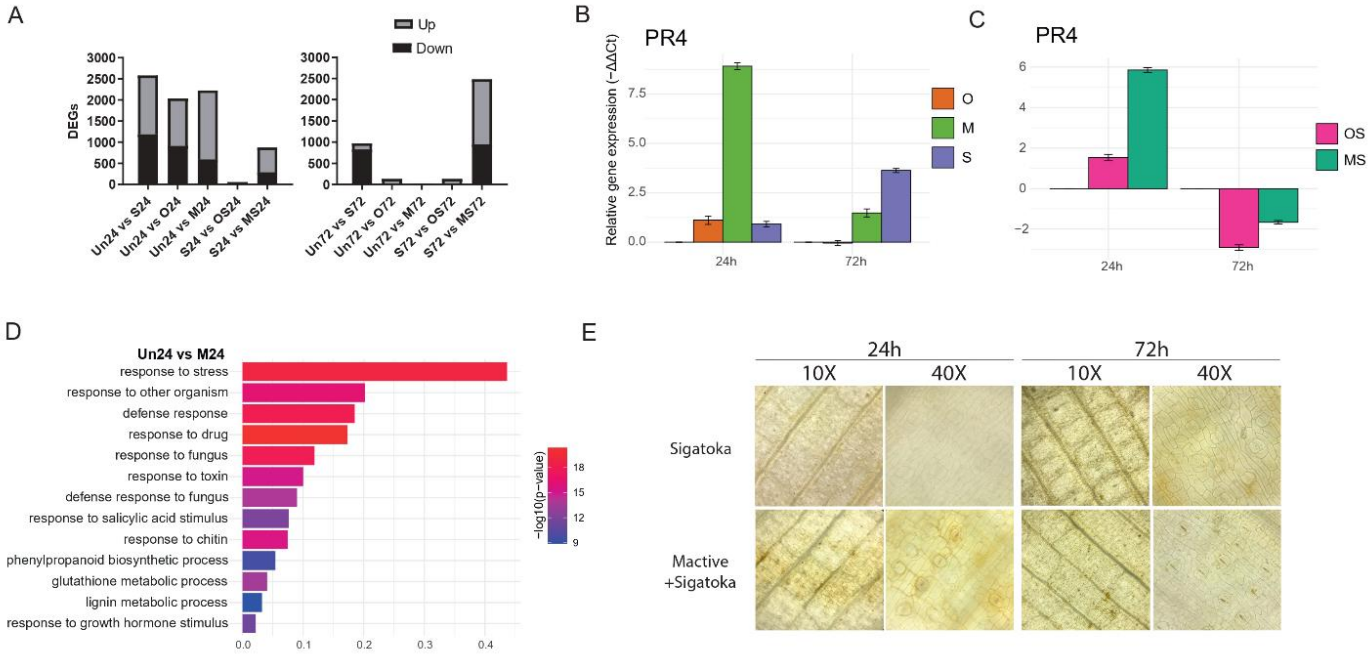


Figura 1. Efecto de MACTIVE® Banana sobre la respuesta transcripcional y fisiológica en plantas de banano frente a la Sigatoka Negra. (**A**) Número total de genes diferencialmente expresados (DEGs) identificados a las 24 y 72 horas post-tratamiento (hpt). Se muestran los DEGs regulados positivamente (Up) y negativamente (Down), considerando un umbral estadístico de p-ajustado < 0.05 y |LFC| ≥ 1. (**B–C**) Expresión relativa del gen PR4, determinada mediante RT-qPCR y calculada usando el método ΔΔCt, 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 ± 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 –log10(p-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 avanzo 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.

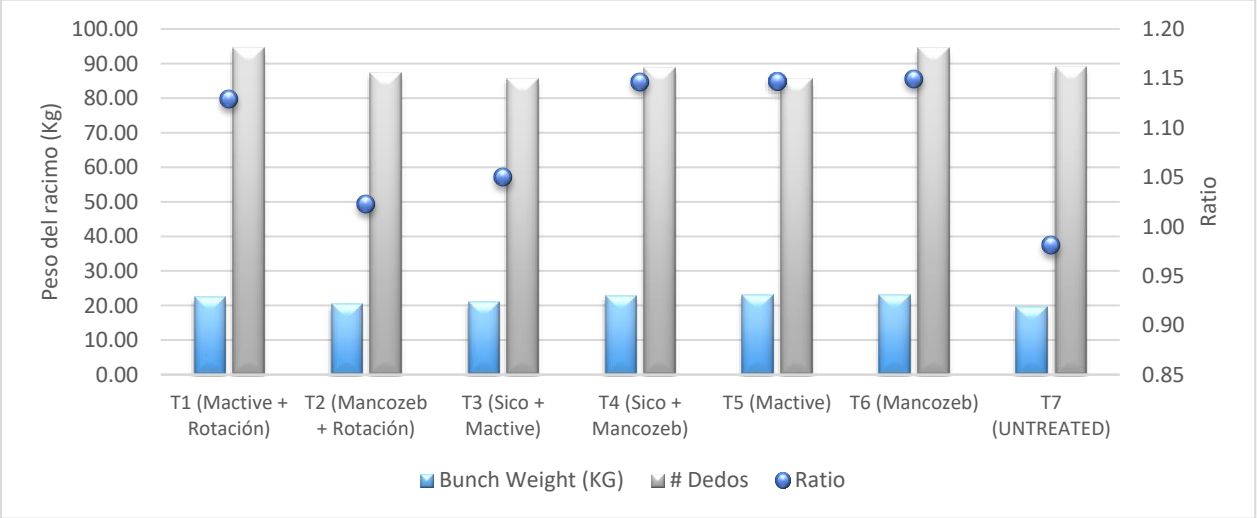


Figura 2. Efecto de diferentes tratamientos fungicidas sobre el peso del racimo, número de dedos y ratio en banano bajo incidencia de *P. fijiensis*.

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.