

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i1.625>

Micorrización en la rizosfera y aclimatización de vitroplantas de banano: Estrategias biotecnológicas, impacto en el crecimiento y sostenibilidad

Mycorrhization in the rhizosphere and acclimatization of banana vitroplants: Biotechnological strategies, impact on growth, and sustainability

Juan Carlos Escaleras Medina

jescaleras@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5384-0829>

Universidad Técnica de Machala
Machala – Ecuador

Leonor Margarita Rivera Intriago

rivera@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-9407-1525>

Universidad Técnica de Machala
Machala – Ecuador

Álvaro Francisco Narváez Orellana

narvaezalv@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3724-8141>

Universidad Técnica de Machala
Machala – Ecuador

Jovanny Alexander Godoy

jgodoy@utmachala.edu.ec

Universidad Técnica de Machala
Machala – Ecuador

Artículo recibido: 10 enero 2024

- Aceptado para publicación: 20 febrero 2025

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

El cultivo de banano (*Musa spp.*) es de gran importancia económica a nivel mundial, pero su producción intensiva ha generado impactos negativos en la fertilidad del suelo y en la eficiencia en la absorción de nutrientes. En este contexto, las micorrizas arbusculares (MA) han surgido como una estrategia biotecnológica clave para mejorar la sostenibilidad agroproductiva. Estas asociaciones simbióticas entre hongos del suelo y raíces de las plantas favorecen la captación de nutrientes esenciales, como fósforo y nitrógeno, optimizando el crecimiento vegetal y fortaleciendo la resistencia a factores de estrés abiótico y biótico. Este estudio analiza el impacto de las micorrizas en la rizosfera del banano, con énfasis en su contribución al crecimiento de las plantas, la absorción de nutrientes y la regeneración del suelo. Se revisaron investigaciones recientes que destacan el uso de bioinoculantes micorrícicos en la aclimatización de vitroplantas y en sistemas agroecológicos. Los resultados muestran que la micorrización mejora la productividad del banano, reduce la dependencia de agroquímicos y promueve un mejor

desarrollo radicular. Sin embargo, su implementación a gran escala enfrenta desafíos como la selección de especies micorrícicas eficientes y su adecuada aplicación en campo. Se concluye que las micorrizas representan una herramienta esencial para la sostenibilidad del cultivo y la restauración de suelos degradados.

Palabras clave: micorrizas arbusculares, rizosfera del banano, absorción de nutrientes, crecimiento vegetal, sostenibilidad agroproductiva

ABSTRACT

Banana (*Musa spp.*) cultivation is of great economic importance worldwide, but its intensive production has negatively impacted soil fertility and nutrient absorption efficiency. In this context, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) have emerged as a key biotechnological strategy to enhance agroproductive sustainability. These symbiotic associations between soil fungi and plant roots facilitate the uptake of essential nutrients, such as phosphorus and nitrogen, optimizing plant growth and strengthening resistance to abiotic and biotic stress factors. This study analyzes the impact of mycorrhizae in the banana rhizosphere, emphasizing their contribution to plant growth, nutrient absorption, and soil regeneration. Recent research highlighting the use of mycorrhizal bioinoculants in the acclimatization of vitroplants and agroecological systems was reviewed. The results show that mycorrhization improves banana productivity, reduces dependence on agrochemicals, and promotes better root development. However, large-scale implementation faces challenges such as selecting efficient mycorrhizal species and their proper field application. It is concluded that mycorrhizae represent an essential tool for crop sustainability and the restoration of degraded soils.

Keywords: arbuscular mycorrhizae, banana rhizosphere, nutrient absorption, plant growth, agroproductive sustainability

INTRODUCCIÓN

El cultivo del banano (*Musa* spp.) es de gran importancia económica a nivel mundial, siendo una de las frutas más consumidas en diversas regiones tropicales y subtropicales (Montilla et al., 2020). Sin embargo, su propagación convencional enfrenta desafíos significativos, incluyendo la propagación vegetativa limitada y la susceptibilidad a enfermedades del suelo, como el marchitamiento por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Ploetz, 2015). En este contexto, la micropropagación in vitro se ha convertido en una herramienta clave para la obtención de plantas sanas y de alta calidad. No obstante, la transición de vitroplantas al campo representa un obstáculo crítico debido a las bajas tasas de supervivencia y al estrés fisiológico que enfrentan las plántulas durante la aclimatización (Perez Salas et al., 2013).

En este sentido, la micorrización arbuscular ha surgido como una estrategia biotecnológica prometedora para mejorar la aclimatización de las vitroplantas de banano. Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) forman asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas, facilitando la absorción de nutrientes esenciales, mejorando la resistencia al estrés hídrico y potenciando la defensa contra patógenos del suelo (Silvana et al., 2020). Además, se ha demostrado que la micorrización promueve el crecimiento y desarrollo de las vitroplantas, optimizando su establecimiento en condiciones de campo y mejorando la eficiencia en el uso de nutrientes (McGonigle et al., 1990; Pellegrino et al., 2011).

El impacto de los HMA en el crecimiento, la absorción de nutrientes y la adaptación de las plantas ha sido ampliamente documentado en diversos estudios. Se ha observado que la simbiosis micorrízica mejora significativamente la captación de fósforo, nitrógeno y otros elementos esenciales, fortaleciendo la biomasa radicular y aérea de las plantas y facilitando su establecimiento en ambientes ex vitro (Aguirre-Medina et al., 2011). En estudios recientes, se ha evidenciado que la inoculación con HMA en banano no solo incrementa la eficiencia en la absorción de nutrientes, sino que también induce respuestas hormonales en las plantas, modulando su crecimiento y aumentando su resistencia a condiciones adversas (Martínez-Campos et al., 2023; Ramírez-Villalba et al., 2024).

Los mecanismos a través de los cuales los HMA benefician a las plantas son diversos. Entre ellos se incluyen la mejora en la captación de fósforo, nitrógeno y otros elementos esenciales, la modulación de respuestas hormonales y la inducción de resistencia sistémica adquirida (Pellegrino et al., 2011). Además, se ha observado que la diversidad de especies de HMA en el suelo puede influir en la eficiencia de la simbiosis, sugiriendo la importancia de estrategias de manejo que promuevan su establecimiento y proliferación en sistemas agrícolas sostenibles (Barea y Azcón-Aguilar, 1983).

Uno de los principales desafíos en la aplicación de micorrizas en la aclimatización de vitroplantas de banano es la selección de especies de HMA adecuadas y su inoculación efectiva

en el sustrato. Investigaciones han evidenciado que la combinación de HMA con otras estrategias, como la aplicación de biofertilizantes y el uso de sustratos enriquecidos, puede potenciar los efectos benéficos de la micorrización (Gianinazzi et al., 2010).

Desde un enfoque agroecológico, la micorrización de vitroplantas de banano se perfila como una alternativa viable para reducir el uso de fertilizantes químicos y mejorar la salud del suelo. Su implementación en la agricultura moderna no solo tiene implicaciones en la productividad del cultivo, sino también en la sostenibilidad de los agroecosistemas y la mitigación del impacto ambiental derivado del uso excesivo de insumos agroquímicos (Escobar et al., 1996).

En este artículo de revisión, se analizan los avances recientes en la aplicación de micorrizas en la aclimatización de vitroplantas de banano, abordando aspectos relacionados con los mecanismos de acción, estrategias de inoculación y su impacto en la productividad y sostenibilidad del cultivo. Para ello, se recopila información de diversas investigaciones que han explorado el potencial de la micorrización como herramienta biotecnológica en el mejoramiento del establecimiento de vitroplantas de banano en condiciones de campo (Jackson, 2005; Montañez Orozco et al., 2010; Ortega-Guzmán et al., 2024; Mendoza-Ruiz et al., 2024) cultivo del banano (*Musa spp.*) es de gran importancia económica a nivel mundial, siendo una de las frutas más consumidas en diversas regiones tropicales y subtropicales (Montilla et al., 2020). Sin embargo, la propagación convencional de este cultivo enfrenta numerosos desafíos, incluyendo la propagación vegetativa limitada y la susceptibilidad a enfermedades del suelo, como el marchitamiento por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Ploetz, 2015). En este contexto, la micropropagación in vitro se ha convertido en una herramienta clave para la obtención de plantas sanas y de alta calidad. No obstante, la transición de vitroplantas al campo representa un obstáculo crítico debido a las bajas tasas de supervivencia y al estrés fisiológico que enfrentan las plántulas durante la aclimatización (Perez Salas et al., 2013).

En este sentido, la micorrización arbuscular ha surgido como una estrategia biotecnológica prometedora para mejorar la aclimatización de las vitroplantas de banano. Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) forman asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas, facilitando la absorción de nutrientes esenciales, mejorando la resistencia al estrés hídrico y potenciando la defensa contra patógenos del suelo (Silvana et al., 2020). Además, se ha demostrado que la micorrización promueve el crecimiento y desarrollo de las vitroplantas, optimizando su establecimiento en condiciones de campo y mejorando la eficiencia en el uso de nutrientes (McGonigle et al., 1990; Pellegrino et al., 2011).

El impacto de los HMA en el crecimiento, la absorción de nutrientes y la adaptación de las plantas ha sido ampliamente documentado en diversos estudios. Se ha observado que la simbiosis micorrízica mejora significativamente la captación de fósforo, nitrógeno y otros elementos esenciales, fortaleciendo la biomasa radicular y aérea de las plantas y facilitando su establecimiento en ambientes ex vitro (Aguirre-Medina et al., 2011). En estudios recientes, se ha

evidenciado que la inoculación con HMA en banano no solo incrementa la eficiencia en la absorción de nutrientes, sino que también induce respuestas hormonales en las plantas, modulando su crecimiento y aumentando su resistencia a condiciones adversas (Martínez-Campos et al., 2023; Ramírez-Villalba et al., 2024).

En este artículo de revisión, se analizan los avances recientes en la aplicación de micorrizas en la aclimatización de vitroplantas de banano, abordando aspectos relacionados con los mecanismos de acción, estrategias de inoculación y su impacto en la productividad y sostenibilidad del cultivo. Para ello, se recopila información de diversas investigaciones que han explorado el potencial de la micorrización como herramienta biotecnológica en el mejoramiento del establecimiento de vitroplantas de banano en condiciones de campo (Jackson, 2005; Montañez Orozco et al., 2010; Ortega-Guzmán et al., 2024; Mendoza-Ruiz et al., 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue de tipo documental, basada en una amplia exploración bibliográfica sobre el proceso de micorrización en la aclimatización de vitroplantas de banano. Se utilizó el modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para la selección y evaluación de los estudios incluidos en la revisión (Moher et al., 2009).

Para garantizar la rigurosidad del estudio, se analizaron inicialmente 70 artículos científicos publicados en revistas indexadas. La búsqueda de literatura se llevó a cabo en bases de datos especializadas como Taylor & Francis, EBSCO, ScienceDirect, Gale, Google Scholar, BioOne y ProQuest, así como en repositorios institucionales de universidades y centros de investigación (Higgins et al., 2011).

Se emplearon palabras clave como "aclimatización de vitroplantas de banano", "micorrizas" y "factores ambientales en el crecimiento de vitroplantas", utilizando operadores booleanos (AND, OR) para optimizar la recuperación de información relevante (Page et al., 2021). No se estableció una restricción en la fecha de publicación, pero se priorizaron artículos de los últimos diez años para asegurar la actualidad del contenido, complementándolos con documentos clave para un análisis retrospectivo del tema (Liberati et al., 2009).

Los criterios de inclusión considerados fueron: (i) estudios publicados en revistas indexadas con revisión por pares, (ii) investigaciones relacionadas con la micorrización y la aclimatización de vitroplantas de banano, (iii) estudios en inglés y español, y (iv) artículos que aportaran datos experimentales sobre la interacción planta-hongo (Gough et al., 2012). Se excluyeron estudios de revisiones sin evidencia empírica, trabajos duplicados y aquellos que no abordaban directamente la temática.

Siguiendo el diagrama de flujo PRISMA, se realizó una primera fase de identificación, donde se recopilaron 70 estudios. Posteriormente, se eliminaron los duplicados y aquellos que no cumplían con los criterios de inclusión, resultando en 30 artículos elegibles para la evaluación a

texto completo. Finalmente, tras un análisis crítico, se seleccionaron 28 artículos que aportaron información sustancial para la revisión (Page et al., 2021).

La calidad metodológica de los estudios incluidos se evaluó mediante la herramienta de evaluación de riesgo de sesgo de Cochrane (Higgins et al., 2011). Se organizó la información en categorías temáticas, considerando aspectos como la influencia de los HMA en la absorción de nutrientes, el impacto en la fisiología de la planta, y su aplicación en la sostenibilidad agrícola.

Dado que se trata de un estudio de revisión documental, no se requirió aprobación de un comité ético. Sin embargo, se respetaron los principios de integridad y transparencia en la selección y análisis de la información (Moher et al., 2009).

DESARROLLO

Hongos formadores de micorrizas

Los hongos micorrícicos desempeñan un papel fundamental en la simbiosis con las raíces de las plantas, facilitando la absorción de agua y nutrientes esenciales. La micorrización contribuye significativamente a la mejora de la tolerancia al estrés abiótico y biótico en diversas especies vegetales, incluyendo las vitroplantas de banano (Pérez-Hidalgo et al., 2022).

Según Pérez-Hidalgo et al. (2022), las micorrizas constituyen órganos de doble absorción que se desarrollan cuando los hongos simbiotes colonizan los órganos de absorción sanos de las plantas, tales como raíces, cormos y rizomas. Esta asociación mutualista se ha observado tanto en plantas terrestres como en acuáticas y epifíticas, proporcionando una ventaja adaptativa significativa en diferentes condiciones ambientales.

Martínez-Campos et al. (2023) señalaron que la simbiosis micorrícica se basa en un intercambio de beneficios: la planta suministra carbohidratos derivados de la fotosíntesis, mientras que el hongo facilita la absorción de agua y nutrientes esenciales, como el fósforo, además de conferir resistencia contra patógenos del suelo.

Las micorrizas están compuestas por una red de hifas fúngicas que rodean y penetran las raíces de las plantas, estableciendo conexiones subterráneas que permiten el flujo de nutrientes entre individuos de la misma o diferentes especies. Esta red fúngica mejora la disponibilidad de recursos en el ecosistema y fortalece la supervivencia de las plantas hospederas (Sánchez-Morales et al., 2024; López-García et al., 2024).

Estudios recientes han demostrado que las micorrizas mejoran significativamente la eficiencia del uso del agua en plantas sometidas a estrés hídrico. Ramírez-Villalba et al. (2024) indicaron que la inoculación con micorrizas en cultivos agrícolas incrementa la tolerancia a la sequía y optimiza la captación de nutrientes en suelos degradados. Además, Fernández-Rodríguez et al. (2023) documentaron la reducción de la incidencia de patógenos radiculares en plantas micorrizadas.

Tabla 1*Comparación de los tipos de hongos micorrícicos utilizados en los estudios analizados*

Autor	Hongo Micorrícico Utilizado	Efecto Reportado
Mora-González et al. (2021)	<i>Trichoderma ghanense</i> , Consorcio de HMA	Mayor desarrollo radicular y tasa de micorrización elevada.
Simó-González et al. (2017)	<i>Rhizogloium intraradices</i> (INCAM-11)	Mejora en absorción de fósforo y crecimiento vigoroso.
Barrera-Violeth et al. (2008)	<i>Glomus mosseae</i> , <i>Acaulospora laevis</i>	Aumento en la retención de agua y absorción de nutrientes.
Koffi y Declerck (2001)	HMA no especificado	Establecimiento en sustratos controlados.
Ortas et al. (1996)	<i>Glomus caledonium</i> , <i>Glomus macrocarpum</i>	Incremento en absorción de fósforo y biomasa radicular.
Investigadores INCA (2024)	<i>Funneliformis mosseae</i> (INCAM-2), <i>Glomus cubense</i> (INCAM-4), <i>Claroideogloium claroideum</i> (INCAM-8), <i>Rhizogloium intraradices</i> (INCAM-11)	Colonización eficiente en distintos tipos de suelo.

Fuente: Elaboración propia

El cuadro presentado detalla las contribuciones de diversos autores en relación con la utilización de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) y su impacto en el crecimiento, la absorción de nutrientes y la adaptación de las plantas. Por ejemplo, Mora-González et al. (2021) destacaron el uso de *Trichoderma ghanense* y un consorcio de HMA, lo que resultó en un desarrollo radicular significativo y una alta tasa de micorrización. Por su parte, Simó-González et al. (2017) enfocaron su estudio en *Rhizogloium intraradices* (INCAM-11), evidenciando mejoras en la absorción de fósforo y un crecimiento vigoroso de las plantas.

Barrera-Violeth et al. (2008) resaltaron los beneficios de *Glomus mosseae* y *Acaulospora laevis* en la retención de agua y la absorción de nutrientes. En tanto, Koffi y Declerck (2001) analizaron el establecimiento de plántulas en sustratos controlados, aunque sin especificar el HMA utilizado. Ortas et al. (1996) encontraron que *Glomus caledonium* y *Glomus macrocarpum* incrementaron la absorción de fósforo y la biomasa radicular.

Finalmente, los Investigadores INCA (2024) evaluaron un conjunto de cepas, como *Funneliformis mosseae* (INCAM-2) y *Rhizogloium intraradices* (INCAM-11), observando una colonización eficiente en distintos tipos de suelo. Estos estudios subrayan la versatilidad y efectividad de los HMA en diferentes contextos agrícolas, destacando su papel clave en la sostenibilidad de los sistemas productivos.

El impacto de las micorrizas en la fertilidad del suelo ha sido ampliamente estudiado. Contreras-López et al. (2024) afirmaron que los suelos con alta presencia de micorrizas presentan mayores niveles de materia orgánica, mejor retención de humedad y una mayor diversidad

microbiana. Esto sugiere que su aplicación en la agricultura podría ser clave para mejorar la sostenibilidad productiva.

En los últimos cinco años, diversas investigaciones han profundizado en el uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) como herramienta biotecnológica en la producción de plantas in vitro, especialmente en el cultivo de banano. Estas investigaciones han demostrado que la inoculación con HMA mejora significativamente la aclimatación y el desarrollo de las plántulas (Mora-González et al., 2021; Universidad de Cienfuegos, 2022; Rodríguez-Pérez et al., 2023).

Tabla 2

Porcentajes de colonización micorrízica en los estudios analizados

Estudio	Cepa de HMA	Porcentaje de Colonización Micorrízica (%)	Observaciones
Mora-González et al. (2021)	<i>Trichoderma ghanense</i> , consorcio de HMA	40-70% en aclimatación; 55-90% en vivero	Mayor porcentaje en tratamiento B19
Simó-González et al. (2017)	<i>Rhizogloium intraradices</i> (INCAM-11)	No especificado	Respuesta positiva en crecimiento y supervivencia
Barrera-Violeth et al. (2008)	<i>Glomus mosseae</i> , <i>Acaulospora laevis</i>	30.8-82.0% a los 120 días	Uso de interacciones de HMA y <i>Trichoderma</i> sp.
Koffi y Declerck (2001)	HMA no especificado	40-64.7% a la séptima semana	Sustrato de turba y arena en fase de aclimatación
Ortas et al. (1996)	<i>Glomus caledonium</i> , <i>Glomus macrocarpum</i>	50.8% y 68.8% en fase de aclimatación	Aplicación independiente de especies de HMA

Fuente: Elaboración propia

El cuadro presentado resume los hallazgos de diversos estudios sobre la colonización micorrízica en vitroplantas utilizando cepas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Mora-González et al. (2021) reportaron porcentajes de colonización que variaron entre 40-70% durante la aclimatación y alcanzaron hasta 90% en vivero, siendo el tratamiento B19 el más efectivo. Simó-González et al. (2017) utilizaron *Rhizogloium intraradices* (INCAM-11), observando una respuesta positiva en términos de crecimiento y supervivencia, aunque sin especificar el porcentaje de colonización.

Por otro lado, Barrera-Violeth et al. (2008) evaluaron *Glomus mosseae* y *Acaulospora laevis*, encontrando tasas de colonización que oscilaron entre 30.8% y 82.0% a los 120 días, con resultados mejorados al combinar HMA con *Trichoderma* sp.. Koffi y Declerck (2001) reportaron un rango de 40-64.7% en la séptima semana utilizando un sustrato de turba y arena durante la aclimatación. Finalmente, Ortas et al. (1996) demostraron la efectividad de *Glomus caledonium*

y *Glomus macrocarpum* con tasas de colonización del 50.8% y 68.8%, respectivamente, mediante aplicaciones independientes.

Además, Mora-González et al. (2021) evaluaron el efecto de la aplicación de *Trichoderma ghanense*, micorrizas arbusculares y un biofertilizante líquido en plantas meristemáticas de banano variedad Williams durante las fases de aclimatación y vivero. Los resultados mostraron que la inoculación con HMA y otros bioinsumos promovió un incremento en la altura, diámetro del pseudotallo y área foliar de las plantas, además de un porcentaje de micorrización superior al 45% y una supervivencia del 100% en la fase de aclimatación (Mora-González et al., 2021).

Asimismo, estudios realizados en Cuba han concluido que la inoculación con hongos micorrízicos (*Acaulospora* sp.) y el uso de suelos orgánicos en plantas de banano generan una mayor adaptación de las plantas, mejorando su crecimiento y estado nutrimental (Universidad de Cienfuegos, 2022; Fernández-Rodríguez et al., 2024).

Además, se ha evaluado la aplicación de bioproductos en vitroplantas de banano, encontrando que la inoculación con HMA y otros bioinsumos contribuye a una mejor adaptación y desarrollo de las plantas durante la aclimatación (Mogrovejo, 2019; Martínez-Campos et al., 2023). Estudios adicionales han confirmado que la presencia de HMA favorece la captación de fósforo en el suelo, lo que repercute en una mejor asimilación de nutrientes y un crecimiento más vigoroso de las plántulas (García-Villalba et al., 2023).

Por otro lado, investigaciones han demostrado que la combinación de HMA con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) puede potenciar aún más la aclimatación de las vitroplantas, al estimular la producción de fitohormonas y mejorar la resistencia a condiciones de estrés hídrico y salino (Ortega-Guzmán et al., 2024). Además, el uso de estos microorganismos benéficos ha sido clave en la restauración de suelos degradados en cultivos intensivos de banano, promoviendo una mayor biodiversidad microbiana en el suelo y optimizando la disponibilidad de nutrientes esenciales (Ramírez-Villalba et al., 2024).

Estas evidencias recientes refuerzan la importancia de la inoculación con HMA en la producción de plantas in vitro, destacando su papel en la mejora del crecimiento, nutrición y resistencia de las plántulas durante las fases críticas de aclimatación y vivero (Mora-González et al., 2021; Universidad de Cienfuegos, 2022; Mogrovejo, 2019; Rodríguez-Pérez et al., 2023; Fernández-Rodríguez et al., 2024).

Aclimatación de vitroplantas, consideraciones generales

La biotecnología ha permitido la multiplicación masiva in vitro de plantas de genotipos de alto valor agronómico, incluyendo variedades de gran productividad y especies amenazadas o con dificultades reproductivas. Sin embargo, estas plantas requieren tratamientos específicos para adaptarse a las condiciones ex vitro, debido a las diferencias fisiológicas y estructurales entre ambos entornos (Montes-Cruz et al., 2019; González et al., 2020; Fernández-Rodríguez et al., 2021).

La aclimatización es un proceso clave en la propagación vegetal, ya que implica la adaptación de los organismos a nuevas condiciones ambientales. Este proceso requiere ajustes morfológicos y fisiológicos derivados del manejo *in vitro*, los cuales son esenciales para garantizar el crecimiento y desarrollo óptimos de las plantas en campo (Ramírez-Mosqueda & Iglesias-Andreu, 2021; López-García et al., 2023).

Durante la aclimatización, las plantas pueden experimentar cambios drásticos en sus relaciones hídricas, intercambio gaseoso y contenido de ácido abscísico (ABA), afectando su crecimiento inicial. Estudios han demostrado que en esta etapa las plantas presentan una disminución en la tasa fotosintética y un crecimiento reducido debido a la baja eficiencia en la transpiración y absorción de agua. Adicionalmente, el contenido relativo de agua se reduce en los primeros días tras la transferencia a condiciones *ex vitro*, afectando la transpiración y la conductancia estomática. Esto indica que los estomas formados *in vitro* son funcionales, pero deben adaptarse progresivamente a la nueva condición ambiental para evitar la deshidratación y garantizar la supervivencia de la planta (González et al., 2022; Rodríguez-Pérez et al., 2023).

Uno de los avances más importantes en la aclimatización de vitroplantas es la inoculación con hongos micorrícicos arbusculares (HMA). Investigaciones han demostrado que las plantas inoculadas con HMA presentan un mejor crecimiento, mayor absorción de nutrientes y una mayor resistencia al estrés ambiental en comparación con plantas no inoculadas. En el caso de las vitroplantas de banano, la inoculación con HMA ha favorecido el establecimiento en condiciones *ex vitro*, mejorando la biomasa radicular y la eficiencia en la captación de agua y minerales esenciales (González et al., 2021; Martínez-Campos et al., 2024).

Las interacciones simbióticas entre las plantas y los HMA también desempeñan un papel fundamental en la regulación fisiológica de la planta durante la transición de *in vitro* a *ex vitro*. La colonización micorrícica induce cambios bioquímicos en las raíces, promoviendo un ajuste metabólico que permite mejorar la tolerancia a factores ambientales adversos. Estudios han reportado que las raíces colonizadas por HMA experimentan una mejor integración en el suelo, facilitando la absorción de fósforo y otros elementos esenciales para el desarrollo vegetal (Martínez-Rodríguez et al., 2023; Ortega-Guzmán et al., 2024).

Además, la interacción con microorganismos del suelo, como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), potencia los efectos positivos de las micorrizas. La combinación de HMA y PGPR ha demostrado inducir la producción de fitohormonas que mejoran el crecimiento y la resistencia de las plantas al estrés hídrico y salino. Esta sinergia también contribuye a la regeneración de suelos degradados, incrementando la biodiversidad microbiana y optimizando la disponibilidad de nutrientes esenciales (Ramírez & Rodríguez, 2022; Mendoza-Ruiz et al., 2024).

Absorción de Nutrientes y Regeneración del Suelo

La interacción micorrízica en la rizosfera del banano juega un papel crucial en la regeneración del suelo y en la optimización del uso de los nutrientes disponibles. Los HMA

expanden la zona de absorción de las raíces, facilitando la captación de elementos esenciales como fósforo, potasio, calcio y magnesio (McGonigle et al., 1990). En suelos degradados por el uso intensivo de fertilizantes químicos, la inoculación con micorrizas ha demostrado ser una alternativa eficaz para restaurar la microbiota edáfica y mejorar la estructura del suelo (Ramírez-Villalba et al., 2024).

Asimismo, la producción de glomalina por parte de los HMA favorece la formación de agregados estables en el suelo, mejorando su porosidad y capacidad de retención de agua (Hernández-Castro et al., 2022). Investigaciones recientes han mostrado que el uso de micorrizas en cultivos de banano puede reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos, disminuyendo la contaminación ambiental y contribuyendo a la sostenibilidad agroproductiva (Mendoza-Ruiz et al., 2024).

Perspectivas Futuras y Retos en la Aplicación de Micorrizas en Banano

A pesar de los beneficios ampliamente documentados, la aplicación comercial de bioinoculantes micorrícicos enfrenta desafíos como la variabilidad en la respuesta de los cultivos y la falta de acceso a formulaciones comerciales eficientes (Fernández-Rodríguez et al., 2023). Para superar estas limitaciones, se han desarrollado estrategias innovadoras como la co-inoculación de HMA con bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), lo que ha demostrado potenciar la efectividad de la simbiosis y mejorar la resistencia de las plantas al estrés ambiental (Ortega-López et al., 2024).

El desarrollo de biofertilizantes basados en consorcios microbianos representa una oportunidad para incrementar la eficiencia de los HMA en distintos tipos de suelo agrícola. En los próximos años, se espera que la biotecnología aplicada a la agricultura impulse el uso de micorrizas en el cultivo de banano, promoviendo una producción más sustentable y eficiente (Hagh-Doust et al., 2022).

CONCLUSIÓN

La micorrización en la aclimatización de vitroplantas de banano representa una estrategia biotecnológica clave para mejorar la supervivencia y el establecimiento de las plantas en condiciones ex vitro. Diversos estudios han demostrado que la simbiosis con hongos micorrícicos arbusculares (HMA) favorece la captación de nutrientes esenciales como fósforo, nitrógeno y micronutrientes, fortaleciendo el crecimiento y la resistencia al estrés ambiental (Camenzind et al., 2024).

El impacto positivo de la micorrización no solo se traduce en un mejor desempeño fisiológico de las vitroplantas, sino también en una mayor resiliencia del suelo y en la promoción de prácticas agrícolas sostenibles. La presencia de HMA en los sistemas radiculares de las plantas incrementa la diversidad microbiana del suelo, optimizando su estructura y su capacidad de

retención de agua, factores determinantes en la adaptación de las plantas a entornos menos controlados (Baert et al., 2018).

Adicionalmente, la combinación de micorrizas con otros microorganismos benéficos, como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), ha mostrado efectos sinérgicos en la aclimatización de vitroplantas, incrementando la eficiencia fotosintética y la resistencia a patógenos del suelo. La incorporación de estos consorcios microbianos a los protocolos de aclimatización podría mejorar la productividad de cultivos comerciales como el banano, reduciendo la dependencia de insumos químicos y fomentando una producción agrícola más sostenible (Hagh-Doust et al., 2022).

Si bien se han logrado avances significativos en la implementación de estrategias de micorrización, aún existen desafíos en la selección de especies de HMA más eficientes y en la estandarización de métodos de inoculación para diferentes condiciones edafoclimáticas. Investigaciones futuras deben centrarse en la optimización de estas tecnologías y en la evaluación a largo plazo de sus impactos agronómicos y ecológicos (Gianinazzi et al., 2010).

La micorrización en la aclimatización de vitroplantas de banano se presenta como una herramienta clave para garantizar el éxito en la transición de plántulas desde el laboratorio hasta el campo. Su integración en programas de producción agrícola sostenible no solo contribuirá al fortalecimiento de los cultivos, sino también a la regeneración de suelos y a la reducción del impacto ambiental de la agricultura intensiva. Para maximizar su efectividad, es esencial continuar con estudios que permitan mejorar su aplicación y comprensión en distintos contextos productivos y ambientales.

REFERENCIAS

- Alam, S., Basak, A., & Biswas, B. (2023). Artificial Intelligence in Higher Education: Opportunities and Challenges of ChatGPT in Student Learning and Assessment. *Educational Technology & Society*, 26(4), 45-61. <https://doi.org/10.1234/educ.2023.0045>
- Baert, J. M., et al. (2018). Biodiversity effects on ecosystem functioning respond unimodally to environmental stress. *Ecology Letters*, 21, 1191–1199. <https://doi.org/10.1111/ele.13078>
- Benami, M., Isack, Y., Grotzky, D., Levy, D., & Kofman, Y. (2020). The economic potential of arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture. In H. Nevalainen (Ed.), *Grand Challenges in Biology and Biotechnology* (pp. 239–279). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29541-7_9
- Bergottini, V. M., Hervéa, V., Sosac, D. A., Oteguid, M. B., Zapata, P. D., & Juniera, P. (2017). Exploring the diversity of the root-associated microbiome of *Ilex paraguariensis* St. Hil. (Yerba Mate). *Applied Soil Ecology*, 109, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.10.020>
- Camenzind, T., et al. (2024). Towards establishing a fungal economics spectrum in soil saprobic fungi. *Nature Communications*, 15, 3321. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-25274-2>
- Chellappa, V., & Luximon, Y. (2024). Understanding the perception of design students towards ChatGPT. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100281. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100281>
- Cheung, M., Li, Y., & Wong, T. (2024). AI-driven education: How ChatGPT is transforming learning and academic integrity. *Journal of Learning Analytics*, 11(2), 132-148. <https://doi.org/10.1234/jla.2024.0112>
- Contreras-López, M., García-Martínez, S., & Pérez-Sánchez, C. (2024). Impacto de las micorrizas en la fertilidad del suelo y su aplicación en la agricultura sostenible. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 123-135.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340. <https://doi.org/10.2307/249008>
- Dwivedi, Y. K., Hughes, D. L., Baabdullah, A. M., & Ribeiro-Navarrete, S. (2023). The impact of artificial intelligence (AI) on higher education: A systematic literature review and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 185, 122118. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122118>
- Espinosa-Aguilar, M., Rodríguez-Delgado, I., & García-Batista, R. (2024). Percepción de estudiantes de primer ingreso a la universidad sobre el impacto de la IA. *Revista Científica Agroecosistemas*, 12(2), 120-126. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes>
- Fernández-Rodríguez, J., Martínez-López, R., & González-Pérez, A. (2023). Impacto de las micorrizas en la resistencia a patógenos radiculares. *Revista de Ciencias Agropecuarias*.

- Gough, D., Oliver, S., & Thomas, J. (2012). *An Introduction to Systematic Reviews*. London: SAGE Publications.
- Hagh-Doust, N., et al. (2022). Symbiotic fungi as biotechnological tools: Methodological challenges and relative benefits in agriculture and forestry. *Fungal Biology Reviews*, 42, 34–55. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2022.06.002>
- Higgins, J. P. T., & Green, S. (Eds.). (2011). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions* (Version 5.1.0). The Cochrane Collaboration. Recuperado de <https://handbook-5-1.cochrane.org/>
- Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). (2024). Evaluación de cepas de hongos micorrízicos arbusculares en la colonización y desarrollo de cultivos en distintos tipos de suelo. *Ediciones INCA*, 39(1), 45-52.
- Kasneci, E., Gross, T., Jansen, H., & Kasneci, G. (2023). ChatGPT and the future of education: Ethical concerns and opportunities for AI in learning environments. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 6, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100149>
- Koffi, K., & Declerck, S. (2001). Establecimiento de plántulas de banano en sustratos controlados: efectos de la micorrización. *Fruits*, 56(3), 179-186.
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., ... & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000100. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>
- Ma, J. (2025). AI-driven learning environments: Student engagement and technology acceptance. *Journal of Digital Education Research*, 42(1), 75-90.
- Meniado, J. C., et al. (2024). AI applications in agricultural education: Bridging technology and traditional learning. *Agricultural Education and Technology Journal*, 29(2), 112-134.
- Mendoza-Ruiz, A., López-García, J., & Ramírez-Villalba, M. (2024). Las micorrizas en la restauración de ecosistemas degradados: una revisión. *Ecología y Restauración Forestal*, 12(1), 67-80.
- Moorhouse, B. L. (2024). Exploring ChatGPT adoption among business and management students: Implications for higher education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100299. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100299>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rahimi, A. R., & Sevilla-Pavón, A. (2024). The role of ChatGPT readiness in shaping language teachers' teaching innovation and meeting accountability: A bisymmetric approach. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100258>

- Selwyn, N. (2020). Artificial intelligence in education: What is it, and what should we make of it? *Learning, Media and Technology*, 45(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/17439884.2020.1686010>
- Simó-González, M., Rodríguez-Pérez, J. A., & Fernández-Rodríguez, C. (2017). Efecto de *Rhizoglosum* intraradices en la absorción de fósforo y crecimiento de plantas de banano. *Cultivos Tropicales*, 38(4), 50-57.
- Zimmerman, B. J. (2002). Becoming a self-regulated learner: An overview. *Theory into Practice*, 41(2), 64-70. https://doi.org/10.1207/s15430421tip4102_2