

Biofertilización con hongos micorrízicos en pastos del género *Urochloa* en un suelo ácido de baja fertilidad

Biofertilization with mycorrhizal fungi on *Urochloa* grasses in a low-fertility acid soil

Juan Francisco Ramírez-Pedroso¹ <https://orcid.org/0000-0003-3384-3904>, Mildrey Paz-Medel² <https://orcid.org/0000-0002-3334-995x>, Pedro José González- Cañizares³ <https://orcid.org/0000-0003-3206-0609>, Ramón Rivera-Espinosa³ <https://orcid.org/0000-0001-6621-7446> y Alberto Hernández-Jiménez³ <https://orcid.org/0000-0002-6138-0620>

¹Centro de Investigaciones en Plantas Proteicas y Productos Bionaturales, Calle 5ta Av. y 246 Complejo Barlovento, Playa. La Habana, Cuba. ²Estación Experimental de Pastos y Forrajes, Carretera Central, Crucero Digna, Cascajal, Villa Clara, Cuba. ³Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Gaveta Postal No. 1. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Correo electrónico: jpdedroso@bionaturasm.cu, mildrey@pastos,ucl.minag.cu, pgonzalez@inca.edu.cu

Resumen

Objetivo: Evaluar la respuesta a la biofertilización con hongos micorrízicos arbusculares de cuatro especies de pasto del género *Urochloa*, cultivadas en un suelo ácido de baja fertilidad en la región Sabana de Manacas, Cuba.

Materiales y Métodos: Se evaluaron 12 tratamientos diferentes, generados a partir de la combinación de cuatro especies de pasto y tres inoculantes micorrízicos. Las especies utilizadas fueron *Urochloa brizantha* cv. Marandú, *Urochloa decumbens* cv. CIAT 606, *Urochloa* híbrido cv. 36087 Mulato II y *Urochloa* híbrido cv. BR02/1752 Yacaré. Los inoculantes micorrízicos se formularon con las cepas de hongos micorrízicos arbusculares *Funneliformis mosseae*, *Glomus cubense* y *Rhizogloium irregulare*, respectivamente. Además, se incluyó un grupo control, sin inoculación. El experimento se llevó a cabo según diseño de bloques al azar, con disposición factorial 4 x 4 y cuatro réplicas. La duración total fue de tres años. Se evaluaron las variables frecuencia e intensidad de la colonización micorrízica, número de esporas en la rizosfera, concentraciones de macronutrientes (NPK) en la biomasa aérea, participación de los inoculantes en la nutrición y rendimiento de masa seca.

Resultados: No hubo interacción entre la inoculación con las cepas de hongos micorrízicos arbusculares y las especies de pasto para las variables medidas. Los tratamientos del factor inoculación mostraron diferencias entre sí. Los mayores valores de frecuencia e intensidad de la colonización micorrízica, número de esporas en la rizosfera, concentraciones de nutrientes en la biomasa y participación de los inoculantes en la nutrición y rendimiento de los pastos se alcanzaron con *F. mosseae*, cuyo efecto se mantuvo hasta dos años después de aplicados los inoculantes.

Conclusiones: La biofertilización con *F. mosseae* resulta efectiva para mejorar el estado nutricional y los rendimientos de pastos del género *Urochloa*, cultivados en un suelo ácido de baja fertilidad.

Palabras clave: estado nutricional, rendimiento, factores edáficos

Abstract

Objective: To evaluate the response to biofertilization with arbuscular mycorrhizal fungi of four grass species of the genus *Urochloa*, cultivated on a low-fertility acid soil in the Manacas Savanna region, Cuba.

Materials and Methods: Twelve different treatments were evaluated, generated from the combination of four grass species and three mycorrhizal inoculants. The used species were *Urochloa brizantha* cv. Marandú, *Urochloa decumbens* cv. CIAT 606, *Urochloa* híbrido cv. 36087 Mulato II and *Urochloa* híbrido cv. BR02/1752 Yacaré. The mycorrhizal inoculants were formulated with the arbuscular mycorrhizal fungi strains *Funneliformis mosseae*, *Glomus cubense* and *Rhizogloium irregulare*, respectively. In addition, a control group, without inoculation, was included. The experiment was carried out according to a randomized block design, with a 4 x 4 factorial arrangement and four replications. The total duration was three years. The evaluated variables were: frequency and intensity of mycorrhizal colonization, number of spores in the rhizosphere, macronutrient concentrations (NPK) in aerial biomass, participation of inoculants in nutrition and dry mass yield.

Results: There was no interaction between inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi strains and grass species for the measured variables. The inoculation factor treatments showed differences among themselves. The highest values of frequency and intensity of mycorrhizal colonization, number of spores in the rhizosphere, nutrient concentrations in the biomass and participation of the inoculants in the nutrition and yield of the grasses were reached with *F. mosseae*, whose effect was maintained up to two years after the inoculants were applied.

Conclusions: Biofertilization with *F. mosseae* is effective in improving the nutritional status and yields of grasses of the genus *Urochloa*, grown on a low-fertility acid soil.

Keywords: nutritional status, yield, edaphic factors

Recibido: 29 de mayo de 2023

Aceptado: 03 de noviembre de 2023

Como citar este artículo: Ramírez-Pedroso, Juan Francisco; Paz-Medel, Mildrey; González-Cañizares, Pedro José; Rivera-Espinosa, Ramón & Hernández-Jiménez, Alberto. Biofertilización con hongos micorrízicos en pastos del género *Urochloa* en un suelo ácido de baja fertilidad. *Pastos y Forrajes*. 46:e20, 2023.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido en Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>. El uso, distribución o reproducción está permitido citando la fuente original y autores.

Introducción

Los pastos del género *Urochloa* (syn. *Brachiarria*) se cultivan ampliamente, debido a su alta palatabilidad y capacidad para producir biomasa con adecuado valor nutritivo en condiciones edáficas y climáticas adversas para otras especies (Baptistella *et al.*, 2021). En Cuba, aunque se encuentran extendidos a lo largo del país, tienen una presencia importante en las áreas ganaderas ubicadas en la región geográfica Sabana de Manacas. Esta zona abarca parcialmente las provincias de Matanzas, Villa Clara y Cienfuegos. Sus suelos son de textura ligera, baja fertilidad natural y elevada acidez, condiciones que limitan la productividad de los pastos y su período de vida útil, dando lugar a la aparición de plantas invasoras de escaso valor nutritivo para la alimentación animal (Pereira *et al.*, 2018).

El uso de altas dosis de fertilizantes resulta imprescindible para incrementar la oferta de forraje por unidad de superficie y tiempo y mejorar el valor nutritivo de la biomasa (Silva-Parra *et al.*, 2021; Cabral *et al.*, 2023). No obstante, los altos precios de los fertilizantes y la necesidad de fomentar una ganadería amigable con el medio ambiente conducen a la búsqueda de alternativas biológicas. Estas se basan en el manejo de las interacciones entre los microorganismos del suelo y las plantas, con el propósito de incrementar la productividad de los cultivos agrícolas y reducir la dependencia de insumos externos.

El manejo efectivo de las asociaciones micorrízicas constituye una vía para las intenciones referidas, debido a la capacidad de los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) para incrementar el volumen de suelo que exploran las raíces y, consecuentemente, mejorar el acceso de las plantas a los nutrientes del suelo y al agua, amén de otros beneficios como la inducción de mecanismos de respuesta ante el ataque de agentes patógenos (Chandrasekaran, 2020).

El género *Urochloa* se ha demostrado que la inoculación con cepas eficientes de HMA mejora los rendimientos y el valor nutritivo de la biomasa, contribuye a la recuperación de las plantas después del corte o pastoreo y reduce las dosis de fertilizantes minerales u orgánicos que requieren normalmente estos cultivos (Karti *et al.*, 2021; Chang *et al.*, 2023). Sin embargo, factores relacionados con las características del suelo y la comunidad de HMA residente, la capacidad de las cepas para adaptarse al nicho ecológico donde se introducen, las especies o cultivares y su manejo, pueden influir en la efectividad de la inoculación (Tshibangu-Kazadi *et al.*, 2020; Silva-Parra *et al.*, 2021). De ahí la importancia de evaluar el efecto de la biofertilización con estos microorganismos en los diferentes agroecosistemas.

A partir de estas premisas, este estudio tiene como objetivo evaluar la respuesta a la inoculación con cepas de hongos micorrízicos arbusculares de cuatro especies de pasto del género *Urochloa*, cultivadas en un suelo ácido de baja fertilidad de la región Sabana de Manacas, Cuba.

Materiales y Métodos

Localización. El experimento se realizó en la Estación de Pastos y Forrajes de Cascajal, ubicada a los 22° 39' 44" de latitud norte y 80° 29' 36" de longitud oeste, en la región geográfica Sabana de Manacas, provincia de Villa Clara, Cuba.

Características de suelo. El estudio se ejecutó en un suelo gley nodular ferruginoso (Hernández-Jiménez *et al.*, 2015), cuyas características químicas principales se muestran en la tabla 1.

El suelo poseía elevada acidez, caracterizada por un pH fuertemente ácido, altos valores de acidez intercambiable ($H^+ + Al^{3+}$) y muy bajo porcentaje de saturación por bases (V), además de bajo contenido de materia orgánica y muy bajos niveles de fósforo asimilable y cationes intercambiables (Paneque y Calaña, 2001). Para la caracterización química del suelo en el área experimental se tomaron cinco

Tabla 1. Características químicas del suelo (profundidad 0-20 cm).

pH H ₂ O	MO, %	P, mg 100 g ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIB	H ⁺ + Al ³⁺	Al ³⁺	V, %
			(cmol kg ⁻¹)							
4,8	2,52	5,9	3,32	1,12	0,05	0,1	4,59	4,33	0,06	51
(0,2)	(0,17)	(0,3)	(0,3)	(0,1)	(0,01)	(0,02)	(0,31)	(0,33)	(0,01)	

MO: materia orgánica, CIB: capacidad de intercambio de bases, $H^+ + Al^{3+}$: acidez intercambiable, V: saturación por bases
Valores entre paréntesis indican intervalos de confianza ($\alpha = 0,05$)

muestras por el método del zigzag, a profundidad de 0-20 cm. Las muestras se analizaron según el Manual de Técnicas Analíticas para el análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) (Paneque *et al.*, 2010).

El comportamiento de las precipitaciones durante el período en que se condujo el experimento se muestra en la figura 1.

Diseño experimental y tratamientos. En un diseño de bloques al azar, con arreglo factorial 4 x 4 y cuatro réplicas, se evaluaron 12 tratamientos, resultantes de la combinación de cuatro especies de pasto del género *Urochloa* (*U. brizantha* cv. Marandú, *U. decumbens* cv. CIAT 606, *U.* híbrido cv. 36087 Mulato II y *U.* híbrido cv. BR02/1752 Yacaré) y la inoculación con tres cepas de HMA *Funneliformis mosseae*, cepa INCAM-2 (Nicol. & Gerd.) Walker & Schüßler, *Glomus cubense* cepa INCAM-4, (Y. Rodr. & Dalpé), *Rhizogloium irregulare* cepa INCAM-11 (N. C. Schenck & G. S. Sm. Sieverd., G. A. Silva & Oehl), más un testigo sin inocular. Las parcelas constituyeron la unidad experimental, y tenían una superficie total de 21 m² y un área de cálculo de 14 m².

Procedimiento experimental. El suelo se preparó mediante labores de roturación (arado), grada, cruce (arado) y grada, a intervalos aproximados de 25 días entre cada una. La siembra se realizó en surcos separados a 50 cm, a chorrillo, con dosis de 1 kg de semilla pura germinable ha⁻¹ y a profundidad de 1,5 cm. El experimento se condujo en condiciones de secano y los pastos se fertilizaron con 35 kg ha⁻¹ de N a los 30 días después de la siembra, y luego de cada corte efectuado durante el período lluvioso de cada año con aplicaciones de (30 y 120 kg de P₂O₅ y K₂O ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente) al inicio de cada

época de lluvia. Se utilizaron como portadores, urea, superfosfato triple y cloruro de potasio. El experimento tuvo una duración de tres años.

La inoculación se realizó en el momento de la siembra por el método del recubrimiento de las semillas, para lo que se sumergieron en una pasta fluida, elaborada mediante la mezcla de una cantidad de inóculo sólido, equivalente al 10 % de su peso y agua, en proporción 1:0,6 m/v. Una vez recubiertas las semillas y solidificado el inóculo, se procedió a la siembra. Los inóculos se produjeron en el departamento de biofertilizantes y nutrición de las plantas del INCA. Tenían una concentración de 35 esporas de cada especie de HMA a evaluar por gramo de inoculante, así como abundantes fragmentos de raicillas de la planta hospedera que se utilizó para su multiplicación.

El primer corte se realizó a los 120 días después de la siembra, y posteriormente a intervalos aproximados de 60 y 90 días durante el período lluvioso y poco lluvioso, respectivamente. En cada corte se pesó la masa fresca de la parte aérea de las plantas que ocupaban el área de cálculo de las parcelas. Se tomaron muestras de 200 g, que se llevaron a una estufa de circulación de aire a 70 °C durante 72 horas, para determinar el porcentaje de masa seca (MS), estimar el rendimiento de MS y las concentraciones de N, P y K en la biomasa (Paneque *et al.*, 2011).

Mediciones. Para la evaluación de las variables micorrízicas en cortes alternos se tomaron cinco muestras de raíces por parcela, a profundidad de 0-20 cm con la utilización de un cilindro metálico de 5 cm de diámetro y 20 cm de largo. Las muestras se unieron para formar una muestra compuesta de la que se extrajo 1 g de raicillas para su tinción y clarificación (Rodríguez-Yon *et al.*, 2015). Se

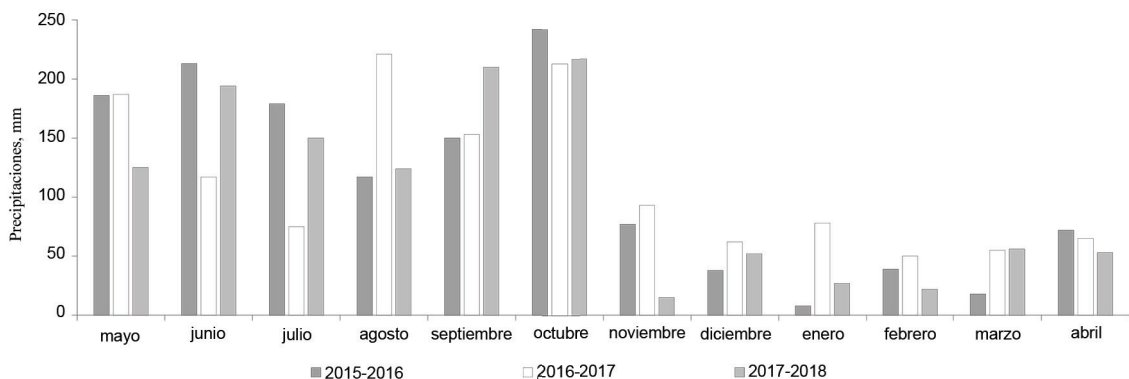


Figura 1. Distribución de las precipitaciones durante el período en que se condujo el experimento.

determinó la frecuencia de colonización micorrízica mediante el método de los interceptos (Giovanetti y Mosse, 1980), la densidad visual o intensidad de la colonización (Trouvelot *et al.*, 1986) y el número de esporas en la rizosfera a partir del tamizado y decantado por vía húmeda de dichas estructuras y su observación en el microscopio (Herrera *et al.*, 1995).

Se determinó la participación de los inoculantes en la nutrición de los pastos (Rivera *et al.*, 2003) mediante la siguiente fórmula:

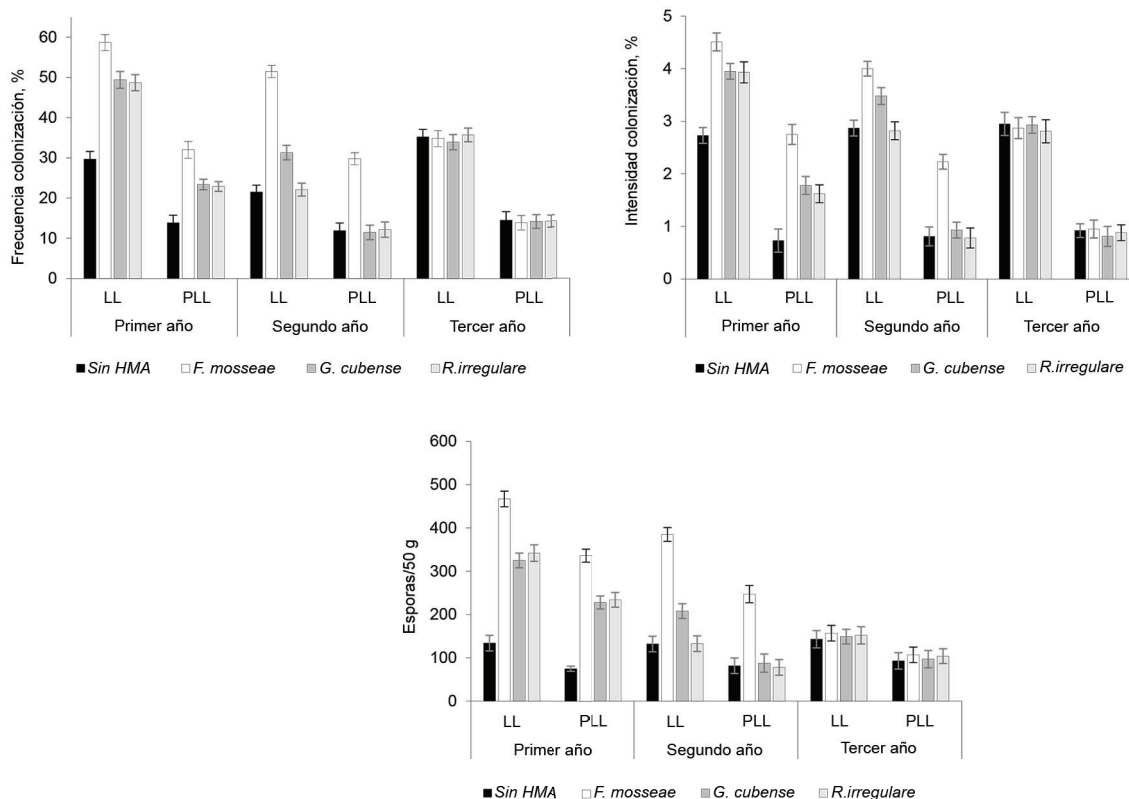
Participación, % = Concentraciones de N, P y K, g kg⁻¹ de MS en la biomasa aérea del tratamiento inoculado-concentraciones N, P y K, g kg⁻¹ de MS en la biomasa aérea del tratamiento no inoculado) / concentraciones de N, P y K, g kg⁻¹ MS en la biomasa aérea del tratamiento inoculado x 100.

Análisis estadístico. Para el procesamiento estadístico, después de comprobadas la normalidad y la homogeneidad de varianza de los datos, se aplicó el análisis de varianza, de acuerdo con el diseño experimental y la prueba de rangos múltiples de

Duncan ($p < 0,05$). Para la caracterización química del suelo, así como para evaluar las estructuras micorrízicas y la participación de los inoculantes en la nutrición de los pastos, se utilizó el intervalo de confianza a $\alpha = 0,05$ (Payton *et al.*, 2000). En todos los casos se usó el programa estadístico SPSS 25 (IBM SPSS Statistics, 2017).

Resultados y Discusión

No hubo interacción entre la inoculación entre las cepas de HMA y las especies de pasto en las estructuras micorrízicas, pero los tratamientos del factor inoculación mostraron diferencias entre sí. Como muestra la figura 2, todas las cepas incrementaron la frecuencia e intensidad de la colonización y el número de esporas en la rizosfera con respecto al testigo sin inocular, que reflejó el nivel de ocupación radical de los HMA residentes. Sin embargo, los mayores valores de estas variables se alcanzaron con *F. mosseae*, cuyo efecto se mantuvo hasta el período poco lluvioso del segundo año.



LL: período lluvioso, PLL: período poco lluvioso

Las barras verticales muestran el intervalo de confianza de las medias. Intervalos de confianza que se solapan entre sí no difieren significativamente ($\alpha = 0,05$)

Figura 2. Efecto de la inoculación con cepas de HMA en la frecuencia e intensidad de la colonización y el número de esporas en la rizosfera.

Los inóculos con *G. cubense* y *R. irregulare* no solo produjeron menores frecuencia e intensidad de colonización y número de esporas que *F. mosseae*, sino que sus efectos tuvieron menor permanencia, pues sólo se observaron hasta el período lluvioso y poco lluvioso del segundo y el primer año, respectivamente. En el tercer año no se observó efecto de la inoculación en las variables micorrízicas.

No se encontraron diferencias significativas entre las especies de pasto para las variables fúngicas, las que también mostraron los mayores valores en el período lluvioso de cada año (figura 3).

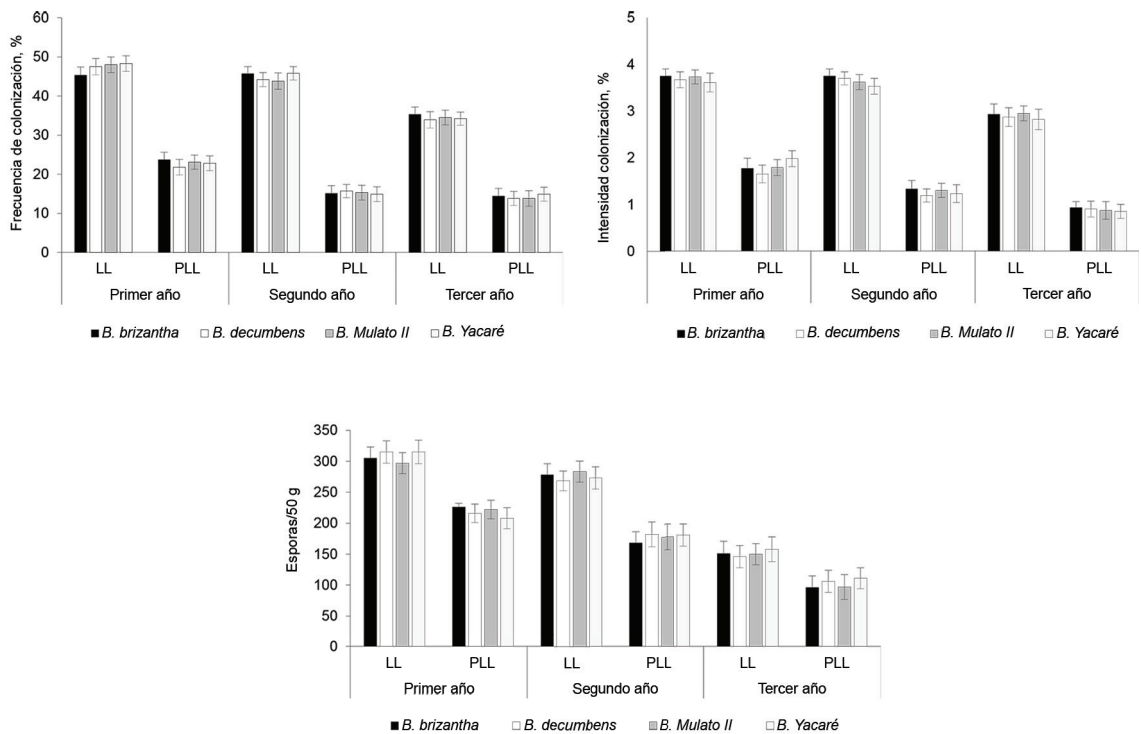
Estos resultados corroboran los encontrados por González-Cañizares (2014), quien al evaluar el efecto de la inoculación con cepas de HMA en pastos del género *Brachiaria* cultivados en dos tipos de suelo, concluyó que para cada condición edáfica hubo, al menos, una cepa altamente efectiva para incrementar los valores de las variables micorrízicas en todas las especies de pasto. Esto indica, de acuerdo con el autor citado, alta compatibilidad entre la cepa eficiente de HMA y el tipo de suelo y baja especificidad entre la cepa eficiente de HMA y las especies de pasto. Estas regularidades se han encontrado también en otros cultivos con diferentes

patrones de crecimiento y requerimientos nutricionales en un grupo importante de suelos (Rivera *et al.*, 2020; Simó *et al.*, 2020).

Existen evidencias consistentes de que las propiedades del suelo, específicamente el pH, influyen marcadamente en la efectividad de la inoculación con cepas de HMA (Tshibangu-Kazadi *et al.*, 2020). De hecho, la inoculación con *F. mosseae* ha sido más efectiva en ambientes edáficos caracterizados por su elevada acidez y baja fertilidad (Rivera-Espinosa *et al.*, 2015), condiciones similares a las del suelo donde se realizó este estudio.

Los mayores valores de frecuencia e intensidad de la colonización y el número de esporas en la rizosfera, registrados en los períodos lluviosos con respecto a los secos, se pueden relacionar con la variación estacional de la producción de biomasa de los pastos. Su mayor crecimiento en la época de más precipitaciones, temperatura y luminosidad, propicia más demanda de nutrientes y, de hecho, mayor formación de estructuras micorrízicas para acceder a los recursos del suelo (Cera *et al.*, 2021).

No hubo interacción entre la inoculación con cepas de HMA y las especies de pasto para las concentraciones (promedios anuales) de macronu-



LL: período lluvioso, PLL: período poco lluvioso

Las barras verticales muestran el intervalo de confianza de las medias. Intervalos de confianza que se solapan entre sí no difieren significativamente ($\alpha = 0,05$)

Figura 3. Efecto de las especies de pasto en la frecuencia e intensidad de la colonización y el número de esporas de HMA en la rizosfera.

trientes en la biomasa, pero el factor inoculación sí mostró diferencias significativas entre tratamientos (tabla 2). Al igual que en las variables fúngicas, todas las cepas incrementaron las concentraciones de N, P y K con relación al testigo sin inocular. Sin embargo, los mayores valores se lograron con *F. mosseae*, cuyo efecto, a diferencia de los inoculantes formulados con *G. cubense* y *R. irregulare*, se prolongó hasta el segundo año. Las concentraciones de estos nutrientes no mostraron diferencias entre las especies de pasto.

La participación de los inoculantes micorrízicos en la nutrición de los pastos se evaluó mediante el incremento porcentual de las concentraciones de N, P y K en la biomasa aérea con respecto al tratamiento no inoculado (figura 3). Solo se muestran los resultados de los dos primeros años, ya que como deja ver la tabla 2, en el tercero no hubo efecto de la inoculación en las concentraciones de estos nutrientes en la biomasa.

Al igual que en las concentraciones de nutrientes en la biomasa aérea, la mayor participación correspondió al inoculante formulado con *F. mosseae*, cuyo efecto se mantuvo hasta el segundo año, aunque con valores inferiores al primero, en los tres elementos. *G. cubense* y *R. irregulare*, además de tener menor participación que *F. mosseae* durante el primer año, tuvieron en el segundo efecto muy bajo,

pues su contribución al incremento de los nutrientes en la biomasa apenas superó 5 %, solo en el fósforo.

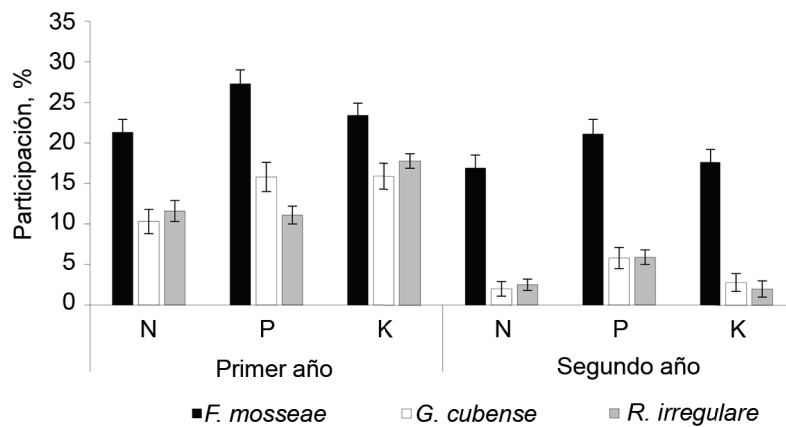
En cultivos forrajeros inoculados con HMA se ha podido constatar que mayores niveles de colonización micorrízica se asocian, generalmente, con aumento en la absorción de nutrientes (Tran *et al.*, 2019; Cavagnaro *et al.*, 2021). Esto pudiera explicar las mayores concentraciones de N, P y K en la biomasa aérea de los pastos inoculados con *F. mosseae*, así como su mayor participación en la nutrición de los tres elementos durante los dos años en que se encontró respuesta a la inoculación. Como muestra la figura 2, durante ese periodo, los niveles de ocupación radical alcanzados con el inoculante que contenía esta cepa, fueron significativamente mayores que con el resto.

En la figura 4 se muestra que, durante el primero y el segundo año, los inoculantes micorrízicos tuvieron mayor contribución a la nutrición fosfórica que a la nitrogenada y potásica. No obstante, de acuerdo con los valores alcanzados, fue más notable con *F. mosseae*. Este comportamiento pudo estar relacionado con la función de las micorrizas en el incremento de la absorción de fosfatos del suelo, incluso de formas poco asimilables (Teutscherova *et al.*, 2019, Chandrasekaran, 2020) y con el aumento del coeficiente de aprovechamiento del fertilizante fosfatado que se aplicó de fondo, sobre todo en el

Tabla 2. Efecto de la inoculación de las cepas de HMA y las especies de pasto en las concentraciones (promedios anuales) de N, P y K en la biomasa aérea, g kg⁻¹.

Tratamiento	Primer año			Segundo año			Tercer año		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Efecto inoculación									
Sin HMA	12,2 ^c	1,6 ^c	11,1 ^b	11,9 ^b	1,7 ^b	11,9 ^b	11,8	1,7	11,7
<i>F. mosseae</i>	15,5 ^a	2,2 ^a	14,5 ^a	14,3 ^a	2,2 ^a	12,5 ^a	12,3	1,5	12,3
<i>G. cubense</i>	13,3 ^b	1,9 ^b	13,2 ^b	12,1 ^b	1,8 ^b	10,1 ^b	12,1	1,6	11,9
<i>R. irregulare</i>	13,8 ^b	1,8 ^b	13,5 ^b	12,0 ^b	1,7 ^b	10,5 ^b	12,2	1,5	12,5
EE ±	0,311	0,102	0,421	0,315	0,103	0,415	0,500	0,101	0,432
Valor - P	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,322	0,489	0,377
Efecto especies de pasto									
<i>U. brizantha</i>	13,7	1,9	12,7	12,6	1,9	11,6	12,1	1,6	12,5
<i>U. decumbens</i>	12,8	2,1	12,9	12,4	2,0	10,9	11,8	1,5	12,3
<i>U. Mulato II</i>	13,9	1,8	13,0	12,7	1,7	11,5	12,3	1,7	11,7
<i>U. Yacaré</i>	13,7	1,7	12,8	12,7	1,8	10,7	11,8	1,5	11,5
EE ±	0,411	0,104	0,371	0,387	0,110	0,502	0,425	0,112	0,507
Valor - P	0,436	0,252	0,327	0,391	0,222	0,411	0,415	0,332	0,451

Letras no comunes en la misma columna difieren significativamente a $p < 0,05$, según dócima de Duncan



Participación, % = $\frac{\text{Concentración de N, P y K, g kg}^{-1} \text{ en la biomasa aérea del tratamiento biofertilizado} - \text{concentración de N, P y K, g kg}^{-1} \text{ de la biomasa aérea del tratamiento no inoculado}}{\text{Concentración de N, P y K, g kg}^{-1} \text{ de la biomasa aérea del tratamiento inoculado}} \times 100$.

Las barras verticales muestran el intervalo de confianza. Medias con intervalos de confianza que se solapan entre sí no difieren significativamente ($\alpha = 0,05$).

Figura 4. Participación de los inoculantes micorrízicos en la nutrición de los pastos.

suelo donde se condujo este experimento. En ellos, los contenidos de fósforo asimilable fueron muy bajos de por sí y, al parecer, no fueron suficientes para satisfacer las necesidades de este nutriente en los pastos inoculados.

No hubo interacción entre la inoculación con las cepas de HMA y las especies de pasto para el rendimiento de masa seca. No obstante, el factor inoculación y las especies mostraron diferencias entre sí (tabla 3).

En el primer año, en el período lluvioso como en el poco lluvioso, la inoculación con las cepas de HMA incrementó el rendimiento con respecto al tratamiento no inoculado. No obstante, los mayores valores se alcanzaron con *F. mosseae*. En el segundo, con el inoculante formulado con *F. mosseae* también se obtuvo el mayor rendimiento durante ambas épocas. *G. cubense* volvió a incrementar el rendimiento con respecto al tratamiento sin inocular, pero su efecto permaneció sólo hasta el período lluvioso. La influencia del inóculo con *R. irregulare* en esta variable no fue más allá del primer año. En el tercero, no se observó efecto de la inoculación en el rendimiento. Entre las especies de pasto, los mayores rendimientos durante los tres años se alcanzaron con *B. Yacaré*.

Al analizar de forma integral los resultados obtenidos en este experimento, se concluyó que el inoculante micorrízico formulado con *F. mosseae*

fue más efectivo para mejorar el rendimiento de los pastos *B. brizantha*, *B. decumbens*, *B. Mulato II* y *B. Yacaré*, cultivados en un suelo gley nodular ferruginoso de baja fertilidad y elevada acidez. Esto ratificó, en las condiciones en que se condujo el ensayo, la baja especificidad entre las cepas de HMA inoculadas y las especies de pasto, tal como se observó antes al evaluar las estructuras micorrízicas. Este efecto permaneció hasta el período poco lluvioso del segundo año.

Aunque generalmente no se manifiesta una especificidad estricta hongo-planta hospedera, no todas las especies de HMA colonizan con la misma intensidad y eficiencia las distintas especies vegetales, por lo que queda demostrada la existencia de distintos grados de compatibilidad en la simbiosis, como resultado de las influencias del ambiente en la expresión genotípica de ambos simbioses (Morales-Londoño *et al.*, 2019; Rosales-Jenqui *et al.*, 2021).

Trabajos realizados en Cuba, relacionados con la inoculación con HMA en diferentes cultivos agrícolas y tipos de suelos, han demostrado gran relación entre factores edáficos, fundamentalmente el pH, y la efectividad de la cepa inoculada en el aumento de los rendimientos. Se destacan los inoculantes formulados con *F. mosseae* como los más eficientes para las plantas cultivadas en suelos de baja fertilidad (Martín-Alonso *et al.*, 2017).

Tabla 3. Efecto de la inoculación con cepas de HMA y las especies de pasto en el rendimiento de MS durante los tres años en que se condujo el experimento (t ha⁻¹).

Tratamiento	Primer año			Segundo año			Tercer año		
	MS LL	MS PLL	MST	MS LL	MS PLL	MST	MS LL	MS PLL	MST
Efecto inoculación									
Sin HMA	8,3 ^c	3,2 ^c	11,5 ^c	9,3 ^c	3,2 ^b	12,5 ^c	8,6	3,5	12,1
<i>F. mosseae</i>	10,5 ^a	3,9 ^a	14,4 ^a	11,0 ^a	4,1 ^a	15,1 ^a	8,5	3,8	12,3
<i>G. cubense</i>	9,6 ^b	3,3 ^b	12,9 ^b	10,0 ^b	3,2 ^b	13,2 ^b	8,7	3,7	12,4
<i>R. irregulare</i>	9,4 ^b	3,4 ^b	12,8 ^b	9,6 ^c	3,3 ^b	12,8	8,7	3,6	12,2
EE ±	0,210	0,102	0,231	0,223	0,112	0,231	0,180	0,109	0,198
Valor - P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,113	0,143	0,115
Efecto especies de pasto									
<i>U. brizantha</i>	9,1 ^b	3,4 ^b	12,4 ^b	9,9 ^b	3,1 ^b	13,0 ^b	8,4 ^b	3,4 ^b	11,8 ^b
<i>U. decumbens</i>	8,9 ^b	3,2 ^b	12,1 ^b	9,9 ^b	3,0 ^b	13,0 ^b	8,5 ^b	3,4 ^b	11,9 ^b
<i>U. híbrido</i> Mulato II	9,1 ^b	3,3 ^b	12,4 ^b	9,9 ^b	3,2 ^b	13,1 ^b	8,3 ^b	3,3 ^b	11,6 ^b
<i>U. híbrido</i> . Yacaré	10,6 ^a	4,1 ^a	14,7 ^a	11,0 ^a	4,5 ^a	15,5 ^a	9,5 ^a	4,5 ^a	14,0 ^a
EE ±	0,231	0,122	0,267	0,224	0,108	0,251	0,207	0,111	0,243
Valor - P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Letras distintas en la misma columna difieren significativamente según Duncan ($p < 0,05$).

MS LL: rendimiento de masa seca durante el período lluvioso, MS PLL: rendimiento de masa seca durante el período poco lluvioso, MST: rendimiento de masa seca total (período lluvioso + poco lluvioso).

El efecto del inoculante micorrízico que contenía la cepa *F. mosseae* en el incremento del rendimiento de los pastos se relacionó con la mejora del estado nutricional de estos últimos, lo que se hizo evidente por las mayores concentraciones de N, P, K en la biomasa aérea alcanzada con la inoculación, como por su mayor participación en la nutrición de los pastos en relación con *G. cubense* y *R. irregulare*. Este hecho se relaciona con el aumento del aprovechamiento de los nutrientes del suelo y de los fertilizantes aplicados a los pastos a partir de la formación de suficientes cantidades de estructuras micorrízicas que facilitaron el acceso de las plantas a estos recursos (Huang *et al.*, 2020, Bouskout *et al.*, 2022).

No menos interesante resultó el mejor comportamiento del pasto Yacaré con respecto a las demás especies evaluadas. Aunque en algunas regiones de Cuba este cultivar ha mostrado mayores rendimientos y niveles de persistencia que otras especies de *Urochloa* (Pentón-Fernández *et al.*, 2018), el hecho de que en suelos ácidos y de baja fertilidad haya alcanzado mayor productividad, indica que además de la inoculación con HMA, la inclusión del pasto Yacaré en la estructura varietal de las especies forrajeras también puede ser una opción para incrementar la producción de biomasa en estas condiciones edáficas.

Conclusiones

La biofertilización con inoculante micorrízico formulado con *F. mosseae* constituye una vía efectiva para mejorar el estado nutricional y los rendimientos de pastos del género *Urochloa*, cultivados en suelos ácidos y de baja fertilidad, y que el efecto del inoculante permanece durante los dos primeros años posteriores a su aplicación.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los directivos, editores y revisores de la revista de Pastos y Forrajes Indio Hatuey, por permitirnos publicar en ella, a los profesionales y técnicos del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, por el apoyo en el procesamiento de las muestras en el laboratorio de nutrición y biofertilizantes.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses entre ellos.

Contribución de los autores

- Juan Francisco Ramírez-Pedroso. Lideró las investigaciones, participó en el diseño y ejecución del experimento del que se derivó este artículo. Colaboró en el procesamiento estadístico e interpretación de los resultados experimentales y en la escritura del manuscrito.

- Mildrey Paz-Medel. Contribuyó a la ejecución del experimento, registro de datos y toma muestras, análisis e interpretación de datos.
- Pedro José González-Cañizares. Dirigió la tarea de investigación a partir de la que se concibió el artículo, participó en el diseño del experimento e interpretación de los resultados y en la escritura del trabajo.
- Ramón Rivera-Espinosa. Participó en la ejecución del experimento que condujo a la concepción del artículo y tomó parte en la interpretación de los resultados.
- Alberto Hernández-Jiménez. Intervino en la ejecución del experimento a partir del que se desarrolló el artículo. Contribuyó al diseño y a la interpretación de los resultados del experimento.

Referencias bibliográficas

- Baptistella, J. L. C.; Andrade, Sara A. L. de; Favarin, J. L. & Mazzafera, P. *Urochloa* in tropical agroecosystems. *Front. Sustain. Food Syst.* 4:119, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>.
- Bouskout, M.; Bourhia, M.; Al Feddy, M. N.; Dounas, Hanane; Soufan, Walid; Nafidi, Hiba-Allah & Ouahmane, Lahcen. Mycorrhizal fungi inoculation improves *Capparis spinosa's* yield, nutrient uptake and photosynthetic efficiency under water deficit. *Agronomy*. 12 (1):149, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010149>.
- Cabral, C. E. A.; Cabral, Carla H. A.; Santos, Alyce R. M.; Motta, Aline M. & Mota, L. G. Impactos técnico-econômicos da adubação de pastos. *Nativa*. 9 (2):173-181, 2023. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i2.12047>.
- Cavagnaro, R. A.; Oyarzabal, M.; Oosterheld, M. & Grimoldi, A. A. Species-specific trade-offs between regrowth and mycorrhizas in the face of defoliation and phosphorus addition. *Fungal Ecol.* 51:101058, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2021.101058>.
- Cera, A.; Duplat, Estephania; Montserrat-Martí, G.; Gómez-Bolea, A.; Rodríguez-Echeverría, Susana & Palacio, Sara. Seasonal variation in AMF colonisation, soil and plant nutrient content in gypsum specialist and generalist species growing in P-poor soils. *Plant Soil*. 468:509-524, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05140-3>.
- Chandrasekaran, A. A meta-analytical approach on arbuscular mycorrhizal fungi inoculation efficiency on plant growth and nutrient uptake. *Agriculture*. 10 (9):370, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10090370>.
- Chang, J.; Li, K.; Xie, Jiayao; Zhang, Yanxia; Wang, Sitong; Ren, Haiyan & Liu, M. Integrating native plant mixtures and arbuscular mycorrhizal fungi inoculation increases the productivity of degraded grassland. *Agronomy*. 13 (1):7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010007>.
- Giovanetti, M. & Mosse, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytol.* 84 (3):489-500, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>.
- González-Cañizares, P. J. Manejo efectivo de la simbiosis micorrízica arbuscular vía inoculación y la fertilización mineral en pastos del género *Brachiaria*. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. San José de las Lajas, Cuba: Universidad Agraria de La Habana, 2014.
- Hernández-Jiménez, A.; Pérez-Jiménez, J. M.; Bosch-Infante, D. & Castro-Speck, N. *Clasificación de los suelos de Cuba 2015*. Mayabeque, Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Instituto de Suelos, Ediciones INCA. 2015.
- Herrera, R. A.; Ferrer, R. L.; Furrázola, E. & Orozco, M. O. *Estrategia de funcionamiento de las micorrizas VA en un bosque tropical. Biodiversidad en Iberoamérica. Ecosistemas, Evolución y Procesos Sociales. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma XII, Diversidad Biológica*. (Ed. Maximina Monasterio). Mérida, México, 1995.
- Huang, G.-M.; Zou, Y.-N.; Wu, Q.-S.; Xu, Y.-J. & Kuča, K. Mycorrhizal roles in plant growth, gas exchange, root morphology, and nutrient uptake of walnuts. *Plant Soil Environ.* 66 (6):295-302, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17221/240/2020-PSE>.
- IBM SPSS Statistics. *SPSS Statistical Software, Version 25*. USA: IBM® SPSS® Statistics, 2017.
- Karti, P. D. M. H.; Prihantoro, I. & Aryanto, A. T. Evaluation of inoculum arbuscular mycorrhizal fungi in *Brachiaria decumbens*. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 694:012048, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/694/1/012048>.
- Martín-Alonso, Gloria M.; Tamayo-Aguilar, Y.; Ramírez-Pedroso, J. F.; Varela-Nualles, M. & Rivera-Espinosa, R. Relación entre la respuesta de *Canavalia ensiformis* a la inoculación micorrízica y algunas propiedades químicas del suelo. *Cultivos Tropicales*. 38 (3):24-29, http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-593620170003000003&lng=es&tlng=es, 2017.
- Morales-Londoño, Diana M.; Meyer, E.; González, D.; González-Hernández, Anabel; Soares, C. R. F. S. & Lovato, P. E. Landrace maize varieties differ from conventional and genetically modified hybrid maize in response to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*. 29:237-249, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-019-00883-5>.
- Paneque, V. M. & Calaña, J. M. *La fertilización de los cultivos: aspectos teórico-prácticos para su*

- recomendación. San José de las Lajas, Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 2001.
- Paneque, V. M.; Calaña, J. M.; Calderón, M.; Borges, Y.; Hernández, T. & Caruncho, M. *Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos*. San José de las Lajas, Cuba: Ediciones INCA, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 2010.
- Paneque, V. M.; Calaña, J. M.; Calderón, M.; Borges, Y.; Hernández, T. & Caruncho, M. *Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos*. Mayabeque, Cuba: Ediciones INCA, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 2011.
- Payton, M. E.; Miller, A. E. & Raun, W. R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. *Commun.*, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103620009370458>.
- Pentón-Fernández, Gertrudis; Martín-Martín, G. J.; Milera-Rodríguez, Milagros de la C. & Prieto-Abreu, Marlene. Agroproductive effect of silkworm rearing waste as biofertilizer in two forage species. *Pastos y Forrajes*. 41 (2):105-112, http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v41n2/en_pyf05218.pdf, 2018.
- Pereira, Lilian E. T.; Herling, V. R.; Avanzi, J. C. & Silva, Sila C. da. Morphogenetic and structural characteristics of signal grass in response to liming and defoliation severity. *Pesqui. Agropecu. Trop.* 48 (1):1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4849212>.
- Rivera, R. & Fernández, Kalyanne. Bases científico-técnicas para el manejo de los sistemas agrícolas micorrizados eficientemente. En: R. Rivera y Kalyanne Fernández, eds. *El manejo efectivo de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible: Estudio de caso El Caribe*. San José de las Lajas, Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 2003.
- Rivera, R.; Martín, Gloria; Simó, J.; Pentón, Gertrudis; García-Rubido, Milagros; Ramírez, J. *et al.* Beneficios del manejo conjunto de abonos verdes e inoculantes micorrízicos en la producción agrícola. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 23:97, <https://www.revista.coba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3294/1497>, 2020.
- Rivera-Espinosa, R.; González, P. J.; Hernández-Jimenez, A.; Martín, Gloria; Ruíz, L.; Fernández, Kalyanne *et al.* La importancia del ambiente edáfico y del pH sobre la efectividad y la recomendación de cepas eficientes de HMA para la inoculación de los cultivos. *VIII Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo*, La Habana, 2015.
- Rodríguez-Yon, Yakelin; Arias-Pérez, Lianne; Medina-Carmona, Aida; Mujica-Pérez, Y.; Medina-García, Laura R.; Fernández-Suárez, Kalyanne & Mena-Echevarría, Aracely. Alteración de la técnica de tinción para determinar la colonización micorrízica. *Cultivos Tropicales*. 36 (2):18-21, http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000200003&lng=es&tlng=es, 2015.
- Rosales-Jenqui, P. R.; González-Cañizares, P. J. & Fundora-Sánchez, L. R. Respuesta del pasto Yacaré (*Urochloa híbrido* cv. CIAT BR02/1752) a la biofertilización con hongos micorrízicos arbusculares. *Cultivos Tropicales*. 42 (1):e01, http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362021000100001&lng=es&tlng=es, 2021.
- Silva-Parra, Amanda; Mogollón-Ortiz, Angela M. & Delgado-Huertas, H. Response of arbuscular mycorrhizal fungi and soil chemical properties to *Brachiaria decumbens* grass production technologies. *Braz. arch. biol. technol.* 64:e21190323, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021190323>.
- Simó, J. E.; Rivera, R. A.; Martínez, L. A. & Martín, Gloria M. La integración de inoculantes micorrízicos, abonos verdes y abonamiento orgánico-mineral en plantaciones de bananos en suelos pardos. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 23 (1):1-15, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.2882>.
- Teutscherova, Nikola; Vazquez, E.; Arevalo, Ashly; Pulleman, Mirjam; Rao, I. & Arango, J. Differences in arbuscular mycorrhizal colonization and P acquisition between genotypes of the tropical *Brachiaria* grasses: is there a relation with BNI activity? *Biol. Fertil. Soils*. 55 (4):325-337, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01353-y>.
- Tran, B. T. T.; Watts-Williams, Stephanie J. & Cavanaro, T. R. Impact of an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth and nutrition of fifteen crop and pasture plant species. *Funct. Plant Biol.* 46 (8):732-742, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP18327>.
- Trouvelot, A.; Kough, J. L. & Gianinazzi-Pearson, Vivienne. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In: S. Gianinazzi-Pearson V. and Gianinazzi, eds. *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae*. Paris: INRA. p. 217-221, 1986.
- Tshibangu-Kazadi, A.; Shutcha, M. N.; Baert, G.; Haesaert, G. & Mukobo-Mundende, R. P. Effect of soil properties on arbuscular mycorrhizae fungi (AMF) activity and assessment of some methods of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) inoculation in Lubumbashi region (DR. Congo). *Sch. Bull.* 6 (8):198-207, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36348/sb.2020.v06i08.002>.