

Evaluación de inoculantes micorrízicos arbusculares en *Zea mays* L. sobre suelo Gleysol Vértico de Panamá

Evaluation of arbuscular mycorrhizal inoculants in *Zea mays* L. on Vertic Gleysol soil of Panama

Aquile Álvarez-González¹ <https://0000-0002-6722-7344>, Gloria Marta Martín-Alonso² <https://orcid.org/0000-0002-4298-9027> y Ramón Antonio Rivera-Espinosa² <https://orcid.org/0000-0001-6621-7446>

¹Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Darién (CRUD), Corregimiento de Metetí, Distrito de Pinogana, Comunidad de Villa Darién, Estafeta Universitaria, Apartado 3366, Panamá 4, Panamá. ²Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Gaveta Postal No 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, CP 32700. Correo electrónico: gloriam@inca.edu.cu, rrivera@inca.edu.cu

Resumen

Objetivos: Determinar el inoculante micorrízico arbuscular más eficiente en el crecimiento y desarrollo de *Zea mays* L. en un suelo gleysol vértico de Darién, República de Panamá.

Materiales y Métodos: El experimento se realizó en condiciones de macetas de 5 kg de capacidad, repetido en dos ocasiones. Se evaluaron los inoculantes basados en las cepas *Funneliformis mosseae* (syn. *Glomus mosseae*), cepa INCAM 2; *Glomus cubense*, cepa INCAM 4 y *Rhizophagus irregularis* (syn. *Rhizoglomus irregulare*), cepa INCAM 11, en un diseño completamente aleatorizado y cinco repeticiones.

Resultados: Al realizar el análisis de componentes principales, las dos primeras componentes explicaron 85,8 y 99,1 % de la varianza total en la primera y segunda repetición del experimento, respectivamente. Además, los mayores valores de las variables evaluadas siempre se encontraron con la inoculación de la cepa INCAM2.

Conclusiones: Los resultados demuestran que *Z. mays* responde positivamente a la inoculación micorrízica, con incrementos positivos de las variables evaluadas. El comportamiento entre los tres inoculantes en estudio dejó ver diferente grado de efectividad. El inoculante más efectivo en la condición edafoclimática estudiada fue el que contenía la cepa INCAM2, de la especie *Funneliformis mosseae* (syn. *Glomus mosseae*).

Palabras clave: cepas microbiológicas, maíz, *Glomus mosseae*

Abstract

Objectives: To determine the most efficient arbuscular mycorrhizal inoculant on the growth and development of *Zea mays* L. on a vertic gleysol soil of Darién, Republic of Panama.

Materials and Methods: The experiment was conducted under conditions of 5-kg pots, repeated twice. Inoculants based on the strains *Funneliformis mosseae* (syn. *Glomus mosseae*), strain INCAM 2; *Glomus cubense*, strain INCAM 4 and *Rhizophagus irregularis* (syn. *Rhizoglomus irregulare*), strain INCAM 11, were evaluated in a complete randomized design with five replicas.

Results: When the principal component analysis was performed, the first two components explained 85,8 and 99,1 % of the total variance in the first and second replicas of the experiment, respectively. In addition, the highest values of the evaluated variables were always found with the inoculation of strain INCAM2.

Conclusions: The results show that *Z. mays* responds positively to mycorrhizal inoculation, with positive increases in the evaluated variables. The performance of the three inoculants under study showed different degrees of effectiveness. The most effective inoculant under the studied edaphoclimatic conditions was the one containing strain INCAM2, of the species *Funneliformis mosseae* (syn. *Glomus mosseae*).

Keywords: microbiological strains, corn, *Glomus mosseae*

Introducción

Zea mays L. (maíz) ocupa en la agricultura de América Latina una posición destacada, pues se destina para el consumo humano y animal. En este último caso, forma parte de los alimentos concentrados y también se utiliza como forraje. En los últimos años, se ha potenciado su uso como

biocombustible, lo que ha traído como consecuencia su encarecimiento en el mundo. Actualmente, es uno de los cereales más cultivados.

Según datos de la FAO, este cultivo se produce en todos los continentes y se cultiva en más de 201 millones de hectáreas. Su rendimiento promedio en 2020 fue de 5,8 t/ha y su producción total mundial

Recibido: 14/10/2022
Aceptado: 22/12/2022

Como citar este artículo: Álvarez-González, Aquile; Martín-Alonso, Gloria Marta & Rivera-Espinosa, Ramón Antonio. Evaluación de inoculantes micorrízicos arbusculares en *Zea mays* L. sobre suelo Gleysol Vértico de Panamá. *Pastos y Forrajes*. 45:eE26, 2022.

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.

de 1 162 millones de toneladas (FAOSTAT, 2022). En la República de Panamá, *Z. mays* ocupa un lugar importante entre los productos agrícolas para el consumo nacional (Gordon-Mendoza, 2021).

Para alcanzar rendimientos elevados en este cultivo, es necesario el manejo eficiente de la nutrición, que conlleva a resultados económicos positivos. En los últimos años, es evidente la necesidad de desarrollar tecnologías sostenibles para la producción de alimentos, que potencien la actividad de la microbiota del suelo y el uso de microorganismos, con el fin de disminuir la utilización de insumos externos y el consumo de energía (Schütz *et al.*, 2018).

La utilización de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) desempeña una función importante entre las alternativas nutricionales de las plantas. Se estima que cerca de 75 % de las especies vegetales establecen la simbiosis micorrízica. Esta asociación, mutuamente beneficiosa, le permite a las plantas recibir agua y nutrientes que se encuentran en condiciones subóptimas y, a la vez, la planta le entrega al hongo productos derivados de la fotosíntesis (Xiao *et al.*, 2019; Soto-Sogamoso *et al.*, 2022).

La simbiosis micorrízica permite a las plantas que se adapten a las condiciones de estrés biótico y abiótico mediante mayor capacidad de absorción de nutrientes y agua, tolerar mejor las condiciones de salinidad y de metales pesados, mejorar la estructura del suelo, incrementar la actividad biológica en la rizosfera de las plantas y participar en los ciclos de los elementos, así como disminuir los daños causados por diferentes fitopatógenos, incrementando la resiliencia del agroecosistema (Aranguren *et al.*, 2020).

A los efectos de la aplicación en la práctica productiva de las bondades de la simbiosis micorrízica, uno de los enfoques considerados es el de su manejo mediante inoculantes basados en cepas eficientes de HMA. Esta efectividad se manifiesta por su capacidad de colonizar la planta huésped, influir de forma positiva en su crecimiento, desarrollo, contenido de nutrientes y rendimiento, y que la planta hospedera favorezca la multiplicación de los propágulos de dicha cepa en el suelo. A medida que un inoculante tenga mayor magnitud en estos tres aspectos, mejor será su efectividad (Janos, 2007).

El uso de inoculantes eficientes garantiza la colonización del cultivo, y que este reciba las bondades de la simbiosis, siempre y cuando la planta sea dependiente de la micorrización. En Cuba se han realizado varios trabajos, que permiten afirmar que el tipo de suelo define cuáles son las

especies de HMA eficientes para determinada condición edafoclimática (alta especificidad suelo-especie de HMA), aunque la efectividad alcanzada por la inoculación depende del manejo dado a la planta y al suelo (Rivera *et al.*, 2020a).

En la República de Panamá, se han efectuado pocas investigaciones dirigidas al asilamiento de cepas de HMA en los suelos, y no se ha estudiado la efectividad de la inoculación de diferentes inoculantes de HMA en el crecimiento y desarrollo de los cultivos agrícolas. Es por ello que se ha desarrollado este trabajo, con el objetivo de determinar el inoculante de HMA más eficiente en el crecimiento y desarrollo de *Z. mays* en un suelo Gleysol Vértico de Darién, República de Panamá.

Materiales y Métodos

Localización del estudio. Se desarrolló un experimento, repetido en dos ocasiones, durante abril-junio (finales del período poco lluvioso) y junio-agosto (inicios del período lluvioso) del 2019, en condiciones de macetas que contenían suelo Gleysol Vértico, según la clasificación del World Reference Base (Álvarez-González *et al.*, 2021). El suelo procedía de la finca El Mamey, ubicada a 800 m al sur de la Carretera Panamericana, en la localidad de Yaviza, distrito de Pinogama, provincia de Darién, República de Panamá. Las macetas se ubicaron dentro de la casa de vegetación del Centro Regional Universitario de Darién (CRUD), perteneciente a la Universidad de Panamá, ubicada en la localidad de Metetí, provincia Darién.

Diseño y tratamiento experimental. Se utilizaron semillas de *Z. mays*, cultivar IDIAP-MV-1102, procedente del Instituto de Investigaciones Agrarias de Panamá (IDIAP). Se aplicó un diseño completamente aleatorizado y se evaluaron cuatro tratamientos con cinco repeticiones. Los tratamientos en estudio fueron un testigo, sin inocular, y la inoculación por recubrimiento de las semillas (Fernández *et al.*, 2002) de tres inoculantes de HMA, que contenían cada uno las especies *Funneliformis mosseae* (Nicol. y Gerd.) Walker y Schüßler (Rodríguez *et al.*, 2014), cepa INCAM 2 (syn. *Glomus mosseae*); *Glomus cubense* (Rodríguez *et al.*, 2011), cepa INCAM 4 (DAOM241198) y *Rhizophagus irregularis* (syn. *Rhizoglomus irregulare*) (Schüßler y Walker, 2010), cepa INCAM 11 (DAOM711363), procedentes del cepario del INCA, Cuba.

Procedimiento experimental. Una vez extraído el suelo de la finca y trasladado al CRUD, se mezcló y homogenizó, y después se rellenaron macetas

cilíndricas de 5 kg de capacidad, 25 cm de diámetro y 23 cm de altura. Las macetas se trasladaron a la casa de vegetación del CRUD y se colocaron en mesetas rústicas de 1 m de altura sobre el suelo. Esta operación de acarreo y manipulación del suelo para el llenado de las macetas se realizó en las dos ocasiones que se repitió el experimento, 24 horas antes del llenado de las macetas y la inoculación y siembra de las semillas.

Al suelo utilizado en cada uno de los experimentos y sus repeticiones se le tomaron cinco muestras conformadas por cinco submuestras cada una, para evaluar algunas propiedades químicas en el primer horizonte, así como realizar un conteo inicial de esporas de HMA (tabla 1).

Determinaciones realizadas: pH en agua en una relación 1:2,5 por potenciometría. MO (materia orgánica) por Walkley-Black. Extracción de P, K, Mn, Fe, Zn y Cu por solución extractora de Mehlich-1 y determinados por absorción atómica. Extracción de Ca, Mg y Al con KCl 1N, Ca y Mg determinados por absorción atómica y Al por titulación con NaOH 0,01 N. No (número) esporas HMA por Gerdemann y Nicholson (1963)

La casa de vegetación tenía una doble puerta, malla antiáfidos y un techo translúcido, impermeable al agua. El riego se garantizó mediante un sistema automatizado de microaspersores colocados en el techo. Cada 45 minutos dispensaba 0,17 L s⁻¹ de agua en un lapso de 30 minutos.

Para el recubrimiento, se humedecieron las semillas a inocular en agua corriente. Se espolvoreó el inoculante correspondiente a cada tratamiento y se homogenizó, de forma que el inoculante recubriera todas las semillas. Se utilizó una dosis equivalente a 8 % del peso total de las semillas a inocular. En el tratamiento sin inoculación, solo se humedecieron las semillas.

Una vez recubiertas, las semillas se colocaron a la sombra para su secado y luego se sembraron, a razón de cinco semillas por maceta, las que se distribuyeron al azar en la casa de vegetación. A los siete días después de la emergencia, se procedió

al raleo y se dejaron dos plantas por maceta. El experimento se condujo durante 60 días después de la emergencia, al cabo de los cuales se realizó la extracción de las plantas completas para proceder a su evaluación.

Mediciones en la parte aérea. A la parte aérea de las plantas se le determinó la materia seca, la concentración de N, P y K y se calculó la extracción de estos nutrientes. Para determinar la materia seca, las plantas se dividieron en raíces y parte aérea. La parte aérea se colocó en sobres de papel y se secó en una estufa de circulación forzada a 70 °C durante 72 horas hasta alcanzar valores de masa constante, y se pesó en una balanza analítica (Denver Instrument Company TL-6101).

La concentración de nutrientes (NPK) se determinó como porcentaje de la materia seca de la parte aérea por los siguientes métodos:

- Nitrógeno (N): digestión húmeda con H₂SO₄ + Se (Kjeldahl), destilación con equipo Kjeldahl-VAP20_s en presencia de ácido bórico y titulación con HCl
- Fósforo (P): Incineración a 550 °C, extracción con HCl y determinación colorimétrica con el reactivo molibdato de amonio
- Potasio (K): Incineración a 550 °C, extracción con HCl y determinación por espectrofotometría de absorción atómica

El contenido de nutrientes se calculó a partir de los datos de la materia seca de la parte aérea y su correspondiente concentración de cada elemento (% N, P, K), por la siguiente fórmula:

Extracción de N, P, K = (materia seca × % elemento en cada órgano) / 100

Mediciones en las raíces. A las raíces se les determinó la frecuencia e intensidad de la colonización micorrízica. Se tomaron 250 mg de raicillas en cada muestra de raíces, que se lavaron cuidadosamente para retirarles todo el suelo y se secaron en una estufa de circulación forzada a 70 °C, hasta alcanzar masa constante. Se tiñeron y clarificaron, según la metodología descrita por Rodríguez-Yon *et al.* (2015).

Tabla 1. Algunas propiedades del suelo utilizado en los experimentos realizados en casa de vegetación (0-20 cm de profundidad).

Experimento	MO	pH	Ca	Mg	K	P	Mn	Fe	Zn	Cu	Al	Esporas HMA
	%	H ₂ O	cmol _c /kg	mg/L	mg/L		mg/L		mg/L		cmol _c /kg	No/g suelo
Primera repetición	0,95	6,20	28,10	6,60	56,70	1,00	20,20	9,90	1,30	1,80	0,10	20
Segunda repetición	0,95	6,10	35,40	8,40	52,60	1,00	7,80	7,40	0,90	1,60	0,10	34

La frecuencia de colonización micorrízica se determinó con un microscopio de disección (Carl Zeiss, Stemi 2000-C/50x) mediante el método de los interceptos, desarrollado por Giovanetti y Mosse (1980).

La intensidad de la colonización micorrízica se determinó según la metodología descrita por Trouvelot *et al.* (1986), a partir de la evaluación de la ocupación fúngica de cada intercepto, asignándole un nivel a los porcentajes de ocupación fúngica. Posteriormente, se realizó el cálculo según la fórmula:

$$\% DV = \Sigma A / \Sigma Z \text{ donde:}$$

Z es el número de interceptos contados en cada nivel

A es el resultado de la multiplicación del número de interceptos contados en cada nivel (Z) por el porcentaje de ocupación observada.

Análisis estadístico. Para realizar el análisis estadístico primeramente se comprobó la normalidad de los datos y la homogeneidad de la varianza de las variables evaluadas. Después, se realizó un análisis multivariado de componentes principales para explicar en dimensión reducida los aspectos más relevantes presentes en los datos, en cuanto al comportamiento de los tratamientos en función de las variables. Posteriormente, se realizó un ANOVA simple. En los casos en que se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, las medias se compararon mediante la prueba de rango múltiple de Duncan ($p < 0,05$). Para todos estos análisis, se aplicó el programa STATGRAPHICS Centurión XVI, versión 16.1.18 (StatPoint Technologies, 2012).

Resultados

La figura 1 muestra el biplot de las dos primeras componentes del análisis de componentes principales de los resultados de la prueba de comparación de los inoculantes de HMA en *Z. mays* durante las dos repeticiones del experimento. Las dos primeras componentes principales (CP) explicaron 85,8 y 99,1 % de la varianza total acumulada en la primera y segunda repetición del experimento, respectivamente. Por tanto, resultó un método efectivo para explicar el efecto de los tratamientos, solo a partir de las dos primeras componentes.

La CP 1 presentó una correlación alta y positiva de todas las variables, excepto la frecuencia de colonización en la primera repetición del experimento, que se explicó en la CP2. En la segunda componente, todas las variables contribuyeron en la formación de la primera. La contribución similar de la mayoría de las variables evaluadas a la formación de los componentes en cada una de las dos

repeticiones indicó el alto grado de complementariedad que presentó cada una, como rasgos estructurales que contribuyeron en el crecimiento y desarrollo de *Z. mays*. Además, los mayores valores de las variables se presentaron con el inoculante basado en la cepa INCAM 2.

El comportamiento de la materia seca de la parte aérea de *Z. mays*, a los 60 días después de la siembra, se muestra en la tabla 2. En ambas repeticiones del experimento, los mayores valores de la variable se obtuvieron con la inoculación de INCAM2, aunque en la primera repetición este tratamiento no presentó diferencias con la inoculación de INCAM4.

En la tabla 3 se presenta el comportamiento del contenido de nutrientes en la parte aérea de *Z. mays*. En la primera repetición del experimento, los mayores valores de esta variable se presentaron en los tratamientos inoculados con INCAM2 e INCAM11 para el N. En el caso del P, los mejores comportamientos correspondieron a la inoculación de INCAM2 e INCAM4, y para el K no se obtuvieron diferencias entre los tratamientos.

En la segunda repetición del experimento, los resultados fueron más consistentes. Para los tres macronutrientes, los mayores resultados se lograron con la inoculación de INCAM2. De manera general, este último inoculante siempre presentó los mayores valores de las variables en estudio, resultado similar al obtenido para la materia seca de la parte aérea (tabla 2).

El comportamiento de las variables del funcionamiento fúngico en las raíces de *Z. mays* se presenta en la tabla 4. En la primera repetición del experimento, la frecuencia de colonización fue superior en los tratamientos inoculados con INCAM2, INCAM11 y el control sin inoculación, pero con el inoculante basado en la cepa INCAM4, los valores en esta variable no difirieron de los de la inoculación con INCAM11 y del testigo sin inocular. Sin embargo, no hubo diferencias entre los tratamientos en cuanto a la intensidad de la colonización.

Con respecto a la segunda repetición, la frecuencia de colonización fue mayor en el tratamiento inoculado con INCAM2. No obstante, los valores de intensidad de la colonización fueron semejantes a los de la inoculación con las otras cepas y el control sin inocular.

Las diferencias entre la primera y la segunda repetición del experimento, en cuanto a la variable frecuencia de colonización, ya se había manifestado desde el análisis del biplot (figura 1). Es posible

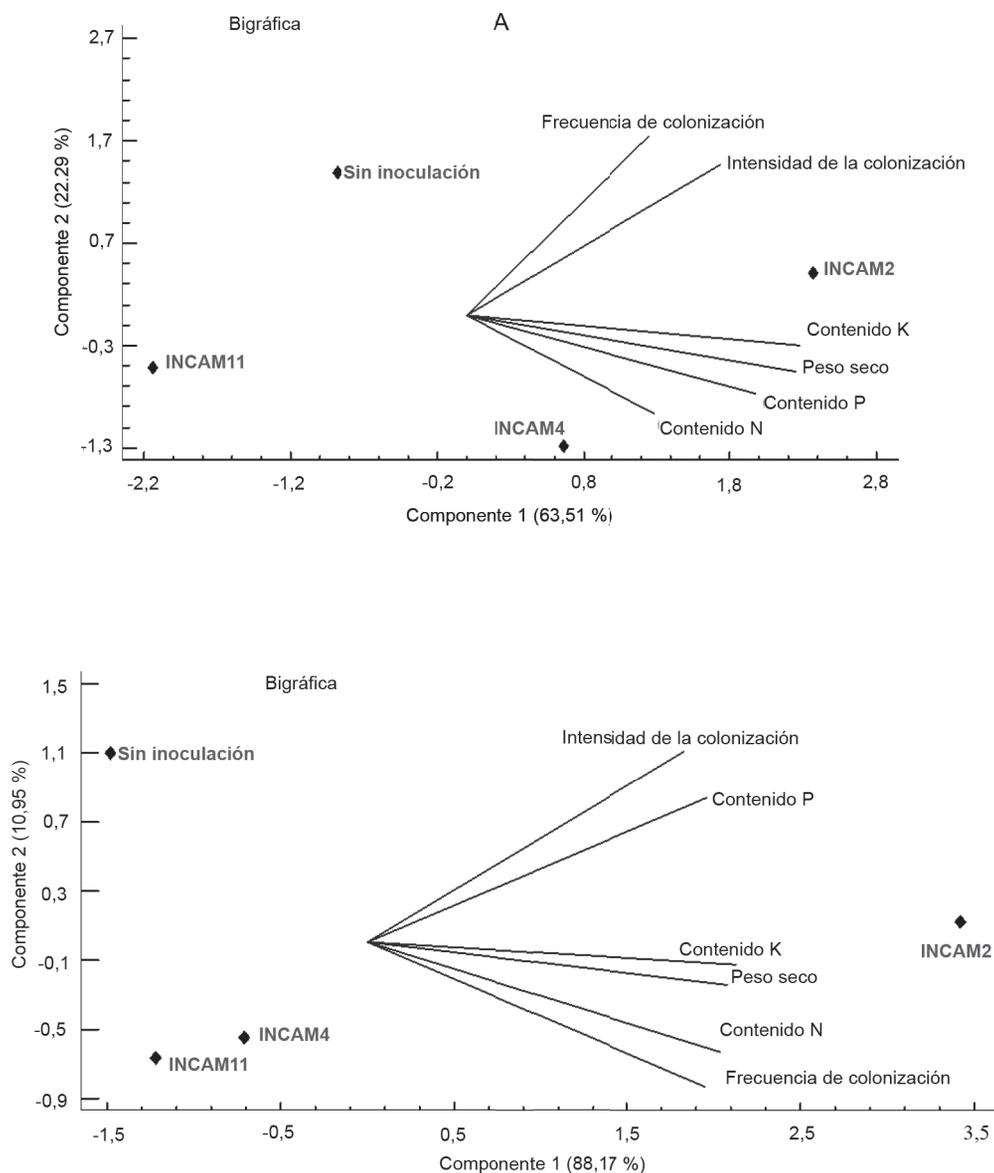


Figura 1. Biplot de las dos primeras componentes de los resultados de la prueba de comparación de inoculantes de HMA en *Z. mays*.

A: primera repetición del experimento B: segunda repetición del experimento

que estas diferencias se deban a la población de esporas residentes de HMA encontradas en el suelo (tabla 1), y que variaron en función del período climático en el que se realizó la colecta de suelo para el montaje de los experimentos.

Las esporas residentes de HMA en el suelo, aunque establecieron simbiosis con el cultivo (según se observa en el comportamiento del tratamiento testigo sin inocular) no fue totalmente eficiente, pues

hubo incremento en las variables de crecimiento y desarrollo de *Z. mays* en los tratamientos inoculados respecto a los no inoculados, según se presentó en los resultados anteriores.

Discusión

Los resultados de esta investigación demostraron que el cultivo de *Z. mays* responde positivamente a la inoculación micorrízica, con incrementos de las

Tabla 2. Efecto de diferentes inoculantes de HMA en la masa seca de la parte aérea de *Z. mays*.

Tratamiento	Masa seca de la parte aérea, g/maceta	
	Primera repetición	Segunda repetición
Sin inoculación	16,8 ^{bc}	8,9 ^c
INCAM11	15,8 ^c	11,0 ^b
INCAM2	24,9 ^a	17,1 ^a
INCAM4	22,7 ^{ab}	10,1 ^{bc}
ES ±	2,22 ^{**}	0,64 ^{**}
Valor - P	0,0263	0,0000

Letras iguales en la misma columna no difieren significativamente, según Duncan para $p \leq 0,05$.

Tabla 3. Contenido de macronutrientes en la parte aérea de *Z. mays* con diferentes inoculantes de HMA, (g/maceta).

Tratamiento	Contenido N		Contenido P		Contenido K	
	Primera repetición	Segunda repetición	Primera repetición	Segunda repetición	Primera repetición	Segunda repetición
Sin inoculación	0,18 ^c	0,087 ^c	0,019 ^{bc}	0,023 ^b	0,38	0,217 ^b
INCAM11	0,83 ^{ab}	0,286 ^b	0,016 ^c	0,018 ^b	0,34	0,238 ^b
INCAM2	1,20 ^a	0,756 ^a	0,024 ^{ab}	0,033 ^a	0,48	0,396 ^a
INCAM4	0,72 ^b	0,352 ^b	0,026 ^a	0,02 ^b	0,45	0,253 ^b
ES ±	0,15 ^{**}	0,036 ^{**}	0,002 ^{**}	0,003 ^{**}	0,05N,S,	0,015 ^{**}
Valor - P	0,0017	0,0000	0,0101	0,0066	0,2039	0,0000

Letras iguales en la misma columna no difieren significativamente según Duncan para $p \leq 0,05$

Tabla 4. Intensidad y frecuencia de colonización por HMA en las raíces de *Z. mays* inoculado con diferentes inoculantes de HMA, (%)

Tratamiento	Frecuencia de colonización		Intensidad de la colonización	
	Primera repetición	Segunda repetición	Primera repetición	Segunda repetición
Sin inoculación	38,5 ^{ab}	26,2 ^c	2,8	2,2 ^{ab}
INCAM11	33,4 ^{ab}	33,2 ^b	1,4	1,1 ^b
INCAM2	42,8 ^a	47,0 ^a	3,1	3,5 ^a
INCAM4	31,3 ^b	36,91 ^b	2,2	1,5 ^b
ES ±	3,72 ^{**}	1,724 ^{**}	0,60 ^{NS}	0,5182 ^{**}
Valor - P	0,0164	0,0000	0,2445	0,0231

Letras iguales en la misma columna no difieren significativamente según Duncan para $p \leq 0,05$

variables evaluadas, y que el comportamiento entre los tres inoculantes en estudio presentó diferente grado de efectividad. Por tanto, resulta indispensable conocer el tipo de inoculante más eficiente para establecer con éxito las bases para el manejo integrado de la nutrición de los cultivos agrícolas. En Cuba, país de origen de los inoculantes de HMA estudiados, existe amplia cantidad de resultados positivos con la utilización de estos inoculantes de HMA en un grupo amplio de cultivos y diferentes condiciones edáficas (Rivera *et al.*, 2022).

Al respecto, se señala que para que un inoculante sea introducido con éxito en la práctica agrícola, debe ser efectivo en la planta huésped, en el incremento de la colonización de las raíces como en la absorción de nutrientes (Elliot *et al.*, 2020), además de brindar importantes ecoservicios en el agroecosistema en general (Salomon *et al.*, 2022).

Con independencia de la especie de planta inoculada, los criterios de efectividad se basan en el tipo de ambiente edáfico en el cual ocurre la inoculación. De ese modo, se han obtenido incrementos en los

rendimientos agrícolas, la materia seca, el contenido de nutrientes y las variables de funcionamiento fúngico (Rivera *et al.*, 2020b). O sea, la baja especificidad de un inoculante de HMA eficiente por tipo de cultivo significa que el inoculante eficiente para una condición edáfica dada, establece una simbiosis efectiva con cualquier cultivo dependiente de la micorrización que se establezca en ese suelo. Los diferentes cultivos muestran distintos efectos cuantitativos, debido a la inoculación. Sin embargo, los inoculantes eficientes siempre son los mismos para cualquiera de los cultivos o, al menos, para la mayoría (Rivera-Espinosa *et al.*, 2022).

En años recientes se han incrementado los resultados en los que se establece la influencia de las condiciones edáficas en el establecimiento y diversidad de especies de HMA (Elliot *et al.*, 2020). Sin embargo, numerosas publicaciones de experimentos desarrollados en Cuba han enfatizado en el impacto de las condiciones del suelo en la respuesta de las plantas a la inoculación con uno u otro inoculante de HMA (Herrera-Peraza *et al.*, 2011).

En estos trabajos, los cambios en la efectividad de los inoculantes se han relacionado con el tipo de suelo, y más recientemente con el ambiente edáfico donde se desarrolla la simbiosis y, fundamentalmente, con el pH del suelo o el sustrato (Rivera *et al.*, 2020b). De ese modo, se ha demostrado que el inoculante basado en la cepa INCAM2 de la especie *F. mosseae* es el que origina la mayor respuesta positiva de las plantas inoculadas que crecían en suelos con rangos de pH semejantes al del suelo de este estudio (Martín *et al.*, 2015).

De acuerdo con estos últimos autores, la definición de ambiente edáfico integra no solo al tipo de suelo, sino al uso de la tierra y los enmendantes, los abonos orgánicos y los fertilizantes químicos que se aplican y determinan el pH en el cual las plantas se desarrollan. Otros autores también han informado la influencia de las propiedades del suelo y su fertilidad en la efectividad del establecimiento de la simbiosis micorrízica (Buil *et al.*, 2022).

Otro aspecto interesante es el que se deriva del comportamiento de la variable frecuencia de colonización micorrízica en las dos repeticiones del experimento. La primera repetición se realizó a finales del período poco lluvioso y la segunda, a inicios del período lluvioso y, aunque los experimentos se realizaron en condiciones de riego controlado, la colecta del suelo se realizó días antes del montaje del experimento, por lo que la condición climática parece que influyó en el contenido de esporas

residentes en el suelo al inicio de los experimentos. Maitra *et al.* (2019) y Vieira Jr. *et al.* (2020) informaron acerca de la estacionalidad de los HMA, debido a que las variaciones en los contenidos de humedad en el suelo inciden directamente en las poblaciones de HMA.

Es necesario considerar la planta huésped en estudio. *Z. mays* responde a la inoculación micorrízica (Martín y Rivera, 2015), con acumulaciones superiores al 40 % con respecto a las plantas no inoculadas, en cuanto a la materia seca y contenido de N en la parte aérea de las plantas y en el rendimiento agrícola (Montenegro-Pozo, 2021).

Los incrementos informados fueron similares a los obtenidos en este estudio. Cervantes-Gómez *et al.* (2021), basados en estudios moleculares, refieren que *Z. mays* es una planta con preferencias para establecer simbiosis con hongos de la familia Glomeraceae.

Estos resultados son muy importantes porque permiten establecer el tipo de inoculante más eficiente para *Z. mays* cultivado en este tipo de suelo, y contribuir de esta manera a profundizar en los estudios relacionados con el manejo integrado de la nutrición de este cultivo mediante el empleo de inoculantes de hongos micorrízicos arbusculares eficientes, según la condición edáfica estudiada.

Los efectos por el uso de un inoculante de HMA, eficiente en el crecimiento en materia seca y la absorción de nutrientes, indican la importancia y beneficios de la simbiosis efectiva. A escala mundial, se han encontrado resultados consistentes que confirman que la absorción de N se facilita mediante la presencia en el suelo de una red efectiva de simbiosis micorrízica, la que además reduce las pérdidas de N en el agroecosistema micorrizado (Bukovská *et al.*, 2021).

Es necesario, además, tener en cuenta que la utilización de las micorrizas en distintos estudios realizados en Cuba ha demostrado el gran potencial que presentan para su utilización en las prácticas agrícolas (Furrazola *et al.*, 2019). Los resultados hallados en las diferentes variables evaluadas en este experimento reafirman lo antes planteado. Al existir un mejor comportamiento de la simbiosis micorrízica, se estimuló el desarrollo vegetativo y la absorción de nutrientes por el cultivo de *Z. mays*. Esto constituyó un indicador válido, que demostró las ventajas del empleo de HMA eficientes en los cultivos de inoculantes, pues estimulan su crecimiento y contenido de nutrimentos, lo que redundará en mayores beneficios para las plantas cultivadas.

Conclusiones

Los resultados de esta investigación demuestran que el cultivo de *Z. mays* responde positivamente a la inoculación micorrizica, con incrementos positivos de las variables evaluadas. Se comprobó además, que el comportamiento entre los tres inoculantes en estudio presentó diferente grado de efectividad. El inoculante más efectivo en la condición edafoclimática estudiada fue la cepa INCAM2, de la especie *F. mosseae* (syn. *G. mosseae*).

Se recomienda proseguir los estudios para optimizar la nutrición del cultivo de *Z. mays*, con el empleo de la cepa INCAM2 de *F. mosseae*, conjuntamente con otras alternativas nutricionales en condiciones de producción.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad de Panamá y a su Facultad de Ciencias Agropecuarias por las facilidades brindadas para la realización de los análisis químicos de las plantas, así como al Laboratorio de Micorrizas del INCA, para las evaluaciones de los indicadores del comportamiento fúngico.

Conflicto de intereses

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

Contribución de los autores

- Aquile Álvarez-González. Montaje de los experimentos, muestreos de suelos y plantas completas, determinaciones químicas en los laboratorios, procesamiento de datos y la escritura del documento.
- Gloria Marta Martín-Alonso. Diseño experimental, montaje de los experimentos, procesamiento de los datos, interpretación de los resultados y escritura del documento.
- Ramón Antonio Rivera-Espinosa. Diseño teórico de la investigación, diseño experimental e interpretación de los resultados y enfoque de la discusión realizada.

Referencias bibliográficas

Álvarez-González, A.; Martín-Alonso, Gloria M.; Mejía-Franco, L. C.; López-Vdovenko, Evangelina & Rodríguez-Yon, Yakelin. Algunas propiedades físicas, químicas y microbiológicas de un suelo agrícola en Darién, República de Panamá. *Cultivos Tropicales*. 42 (4):e06. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362021000400006&lng=es&tlng=es, 2021.

Aranguren, Y. A.; Castellanos, L. & Escalante, J. C. Hongos formadores de micorrizas arbusculares

(HMA) en frutales de Colombia y su comparación con investigaciones internacionales. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 5 (1):27-37. <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcyta/article/view/794>, 2020.

Buil, Paula A.; Jansa, J.; Blažková, Alena; Holubík, O.; Duffková, Renata; Rozmoš, M. *et al.* Infectivity and symbiotic efficiency of native arbuscular mycorrhizal fungi from high-input arable soils. *Plant Soil*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05715-8>.

Bukovská, Petra; Rozmoš, M.; Kotianová, Michala; Gančarčíková, Kateřina; Dudáš, M.; Hřšelová, Hana *et al.* Arbuscular mycorrhiza mediates efficient recycling from soil to plants of nitrogen bound in Chitin. *Front. Microbiol*. 12:574060, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.574060>.

Cervantes-Gámez, Rocio G.; Peñuelas-Rubio, Ofelda; Araujo-Benard, Nathali; Fierro-Coronado, Rosario A.; Trejo-Aguilar, Dora; Maldonado-Mendoza, I. E. *et al.* Diversidad de hongos micorrizicos arbusculares asociados a plantas voluntarias de maíz en suelos de transición: ecosistema natural-uso agrícola. *Sci. fungorum*. 51:e1330, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1330>.

Elliott, A. J.; Daniell, T. J.; Cameron, D. D. & Field, Katie J. A commercial arbuscular mycorrhizal inoculum increases root colonization across wheat cultivars but does not increase assimilation of mycorrhiza-acquired nutrients. *Plants people planet*. 3 (5):588-599, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp3.10094>.

FAOSTAT. Food and Agricultural Organization Statistical. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>, 2022.

Fernández, F.; Gómez, R.; Vanegas, L. F.; Martínez, M. A.; Noval, B. M. de la & Rivera, R. *Producto inoculante micorrizógeno*. Patente No. 22641. La Habana: Oficina Nacional de Propiedad Industrial, 2002.

Furrazola, E.; Torres-Arias, Y.; Hernández-Prado, Rosmery & Gutiérrez-Coronill, Y. Hongos micorrizógenos arbusculares (Glomeromycota) en suelos agrícolas de la provincia Artemisa, Cuba. *Acta Bot. Cub*. 218 (1):34-43. <https://revistasgeotech.com/index.php/abc/article/view/264>, 2019.

Gerdemann, J. W. & Nicholson, T. H. Spore of mycorrhizae endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Brit. mycol. Soc*. 46 (2):235-244. <https://srv2.freepaper.me/n/wSnbIbeX1cYJnqGzqgagLA/PDF/3a/3a70a9cecd93997ca1f0deb7db2beb79.pdf>, 1963.

Giovannetti, 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>.

- Gordon-Mendoza, R. *Manual técnico: El maíz en Panamá: Características, requerimientos y recomendaciones para su producción en ambientes con alta variabilidad climática*. Panamá: Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá. https://proyectos.idiap.gob.pa/uploads/adjuntos/manual_tecnico_el_maiz_en_panama.pdf, 2021.
- Herrera-Peraza, R. A.; Hamel, C.; Fernández, F.; Ferrer, R. L. & Furrázola, E. Soil-strain compatibility: the key to effective use of arbuscular mycorrhizal inoculants? *Mycorrhiza*. 21 (3):183-193, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0322-6>.
- Janos, D. P. Plant responsiveness to mycorrhizas differs from dependence upon mycorrhizas. *Mycorrhiza*. 17 (2):75-91, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-006-0094-1>.
- Maitra, P.; Zheng, Y.; Chen, L.; Wang, Y.-L.; Ji, N.-N.; Lü, P.-P. *et al.* Effect of drought and season on arbuscular mycorrhizal fungi in a subtropical secondary forest. *Fungal Ecol.* 41:107-115, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2019.04.005>.
- Martín, Gloria M.; Reyes, R. & Ramírez, J. F. Coinoculación de *Canavalia ensiformis* (L.) D.C. con *Rhizobium* y hongos micorrízicos arbusculares en dos tipos de suelos de Cuba. *Cultivos Tropicales*. 36 (2):22-29. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000200004, 2015.
- Martín, Gloria M. & Rivera, R. Influencia de la inoculación micorrízica en los abonos verdes. Efecto sobre el cultivo principal. Estudio de caso: el maíz. *Cultivos Tropicales*. 36 (supl. 1):34-50. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000500004&lng=es&tlng=es, 2015.
- Montenegro-Pozo, Lisbeth A. *Evaluación de los efectos de la inoculación micorrízica sobre los parámetros morfológicos y productivos del cultivo de maíz*. Trabajo de integración curricular. Requisito parcial para la obtención del título de Ingeniera Agropecuaria. La Libertad, Ecuador: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://repositorio.upse.edu.ec/xmlui/handle/46000/7586>, 2021.
- Rivera, R. A.; Fernández, F.; Ruiz, L.; González, P. J.; Rodríguez, Y.; Pérez, E. *et al.* Manejo, integración y beneficios del biofertilizante micorrízico EcoMic® en la producción agrícola. (Ed. R. A. Rivera). San José de las Lajas, Cuba: Ediciones INCA, 2020a.
- Rivera, R. A.; Martín, Gloria M.; Simó, J. E.; Pentón, Gertrudis; García-Rubido, Milagros; Ramírez, J. F. *et al.* Benefits of joint management of green manure and mycorrhizal inoculants in crop production. *Trop. Subtrop. Agroecosystems*. 23:97. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3294/1497>, 2020b.
- Rivera-Espinosa, R.; Martín-Alonso, Gloria; Simó-González, J.; Joao, J. P.; García-Rubido, Milagros; Tamayo-Aguilar, Y. *et al.* Bases y beneficios del manejo conjunto de *Canavalia ensiformis* e inoculantes micorrízicos en la producción agropecuaria. *Anales de la ACC*. 12 (1):e1104. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2304-01062022000100006&lng=es&tlng=es, 2022.
- Rodríguez, Yakelin; Dalpé, Yolande & Séguin, Sylvie. Clasificación taxonómica de la cepa de hongo micorrizógeno arbuscular INCAM-2 como *Funneliformis mosseae*, syn. *Glomus mosseae*. *Cultivos Tropicales*. 35 (2):27-33. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362014000200004&lng=es&tlng=es, 2014.
- Rodríguez, Yakelin; Dalpé, Yolande; Séguin, Sylvie; Fernández, Kalyanne; Fernández, F. & Rivera, R. A. *Glomus cubense* sp. nov., an arbuscular mycorrhizal fungus from Cuba. *Mycotaxon*. 118:337-347, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5248/118.337>.
- Rodríguez-Yon, Yakelín; Arias-Pérez, Lianne; Medina-Carmona, Aida; Mujica-Pérez, Yonaisy; Medina-García, Laura R.; Fernández-Suárez, Kalyanne *et al.* Alternativa 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.
- Salomon, M. J.; Demarmels, R.; Watts-Williams, S. J.; McLaughlin, M. J.; Kaffle, A.; Ketelsen, C. *et al.* Global evaluation of commercial arbuscular mycorrhizal inoculants under greenhouse and field conditions. *Appl. Soil Ecol.* 169:104225, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104225>.
- Schüßler, A. & Walker, C. *The Glomeromycota: a species list with new families and new genera*. Gloucester, England: The Royal Botanic Garden Edinburgh, The Royal Botanic Garden Kew, Botanische Staatssammlung Munich, and Oregon State University. https://www.researchgate.net/publication/285775809_The_Glomeromycota, 2010.
- Schütz, L.; Gattinger, A.; Meier, M.; Müller, A.; Boller, T.; Mäder, P. *et al.* Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization—A Global Meta-analysis. *Front. Plant Sci.* 8:2204, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204>.
- Soto-Sogamoso, J. E.; Pinto-Lopera, J. E. & Millán-Rojas, E. E. Micorrizas arbusculares y las

- técnicas de visión artificial para su identificación. *Tecnológicas*. 25 (54):e302, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22430/22565337.2348>.
- StatPoint Technologies. *Manual Statgraphics Centurion. Version 16.1.18*. Las Llanuras, USA, 2012.
- Trouvelot, A.; Kough, J. & Gianinazzi-Pearson, V. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthode d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae. Proceedings of the 1st European Symposium on Mycorrhizae*. Paris: INRA. p. 217-221, 1986.
- Vieira Jr., W. G.; Moura, J. B. de; Souza, R. F. de; Braga, Ana P. M.; Matos, D. J. de C.; Brito, G. H. M. *et al.* Seasonal variation in mycorrhizal community of different Cerrado phytophysiologies. *Front Microbiol*. 11:576764, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.576764>.
- Xiao, D.; Che, R.; Liu, X.; Tan, Y.; Yang, R.; Zhang, W. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi abundance was sensitive to nitrogen addition but diversity was sensitive to phosphorus addition in karst ecosystems. *Biol. Fertil. Soils*. 55:457-469, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01362-x>Xiao.