



Efecto de hongos micorrízicos arbusculares en la fisiología y contenido mineral del cultivo de maíz †

[Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the physiology and mineral content of maize crop]

Arturo Reyes–Ramírez¹, Esaú Ruiz–Sánchez¹, Walther Jesús Torres–Cab^{1*},
Jorge Ismael Tucuch–Haas², Horacio Ballina–Gómez¹,
Gabriel Antonio Lugo–García³, Carlos Juan Alvarado–López⁴,
René Garruña–Hernández⁴, Julio Cesar Ahuatzin–Hernández⁵
and Roberto Rafael Ruiz–Santiago⁶.

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, Av. Tecnológico s/n, C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Email: walther.torres@itconkal.edu.mx

²Campo Experimental Mocochoá, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km 25 antigua carretera Mérida–Motul, 97454, Mocochoá, Yucatán, México.

³Colegio de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calle 16 y Avenida Japaraquí, 81110. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México.

⁴SECIHTI—Instituto Tecnológico de Conkal, Av. Tecnológico s/n, Conkal 97345, Yucatán, México.

⁵Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco AC, Unidad Sureste. Km 5.5 Carretera Sierra Papacal–Chuburná Puerto s/n. CP. 97302 Sierra Papacal, Mérida, Yucatán, México.

⁶GERMOLAB Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, 97205 Mérida, Yucatán

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) is an effective alternative to improve the conditions of maize crop. **Objective.** To evaluate the effect of four commercial AMF products on the physiological development and accumulation of macro and microelements in maize crop. **Methodology.** Under field conditions, the effect of AMF application on physiological parameters and accumulation of macro and microelements in maize leaves and grains was evaluated at 35 and 75 days after sowing. A randomized complete block design was used. The data were analyzed using analysis of variance, and means were compared using Tukey's test. **Results** The Biotech and M-300 treatments significantly enhanced net photosynthesis, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, and water-use efficiency. Supra treatment increased P, K, S, and Mg content in maize leaves. The content of macro and microelements in the grain showed no significant differences. **Implication.** This study highlights the positive influence of AMF inoculation on stomatal conductance and water use efficiency and macroelement content in maize leaves. **Conclusion.** The application of HMA had positive effects on the physiological performance and accumulation of phosphorus, potassium, sulfur, and manganese in maize leaves, but not in maize grain.

Key words: Gas exchange; microbial inoculants; μ -X-Ray Fluorescence.

RESUMEN

Antecedentes. El uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) es una alternativa clave para mejorar las condiciones del cultivo de maíz. **Objetivo.** Evaluar el efecto de cuatro productos comerciales de HMA en el desarrollo fisiológico y acumulación de macro y microelementos en el cultivo de maíz. **Metodología.** El estudio se llevó a cabo

† Submitted January 18, 2025 – Accepted August 21, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6152>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = A. Reyes–Ramírez: <http://orcid.org/0000-0003-2348-5146>; E. Ruiz–Sánchez: <http://orcid.org/0000-0003-0245-3305>; W.J. Torres–Cab: <http://orcid.org/0009-0003-1263-158X>; J.I. Tucuch–Haas: <http://orcid.org/0000-0002-6409-0178>; H. Ballina–Gómez: <http://orcid.org/0000-0002-0561-9027>; G.A. Lugo–García: <http://orcid.org/0000-0002-2756-8224>; C.J. Alvarado–López: <http://orcid.org/0000-0001-7442-8171>; R. Garruña–Hernández: <http://orcid.org/0000-0003-2787-0914>; J.C. Ahuatzin–Hernández: <http://orcid.org/0009-0005-8497-1609>; R.R. Ruiz–Santiago: <http://orcid.org/0000-0001-7698-5828>

en condiciones de campo, empleando un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos (cuatro productos comerciales y un control) y cuatro repeticiones por tratamiento. Las evaluaciones fisiológicas y de contenido mineral en hojas y granos se realizaron a los 35 y 75 días después de la siembra. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar. Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y las medias se compararon utilizando la prueba de Tukey. **Resultados.** Los tratamientos Biotech y M-300 mejoraron la conductancia estomática, el CO₂ intracelular, la fotosíntesis y eficiencia de uso del agua. Los tratamientos Glumix, M-300 y Suppra ocasionaron aumento en el contenido de P, K, S, Ca, Mg, Mn y Cl en las hojas de maíz. El contenido de macro y microelementos en el grano no mostró diferencias significativas. **Implicación.** Este estudio resalta la influencia positiva de la inoculación con HMA en parámetros fisiológicos y el contenido de macroelementos en el follaje de plantas de maíz. **Conclusión.** La aplicación de HMA tuvo efectos positivos en la fisiología de la planta. La aplicación de HMA mejoró la acumulación de fósforo, potasio, azufre, calcio, magnesio, manganeso y cloro en el follaje, pero no en el grano de maíz.

Palabras clave: Intercambio de gases; inoculantes microbianos; μ -Fluorescencia de Rayos X.

INTRODUCCIÓN

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son una alternativa biológica clave dentro de las prácticas agrícolas sostenibles, destacándose por su capacidad para mejorar la estructura del suelo y establecer una simbiosis directa con las raíces de maíz. Esta relación se logra mediante la formación de arbusculos e hifas externas, que amplían la zona de exploración radicular y favorecen la absorción de nutrientes esenciales, así como el desarrollo vegetativo (Majewska *et al.*, 2017). Además, los HMA pueden reducir hasta en un 50 % la dependencia de fertilizantes químicos convencionales (Toljander *et al.*, 2008; Srivastava *et al.*, 2017) y aumentar la tolerancia de las plantas frente a condiciones de estrés biótico y abiótico (Ma *et al.*, 2014; Lenoir *et al.*, 2016).

Asimismo, su aplicación induce cambios positivos en el movimiento del agua dentro y fuera de las plantas, lo que mejora la hidratación de los tejidos y su fisiología (Gong *et al.*, 2013; Jayne y Quigley, 2014; Mirshard *et al.*, 2016; Ruiz-Lozano *et al.*, 2016). Las plantas micorrizadas se caracterizan por presentar una mayor tasa de asimilación neta (P_N), conductancia estomática (g_s) y tasa de transpiración (E) (Quiroga *et al.*, 2018; Chandrasekaran *et al.*, 2019). Augé (2016), señala que las plantas inoculadas pueden incrementar hasta un 20 % su conductancia estomática, mientras que Zhu *et al.* (2012) reportan un aumento en la tasa de transpiración, tanto en condiciones de riego como en estrés hídrico. Este aumento en la actividad fisiológica está relacionado con el aporte de carbono fotosintético, del cual entre un 10 % y un 23 % se destina a sostener las estructuras micorrízicas en las raíces, lo que promueve tasas fotosintéticas más elevadas (Harris *et al.*, 1985; Jakobsen y Rosendahl, 1990; Valentine *et al.*, 2013).

Diversos estudios han demostrado que los HMA favorecen la absorción y el intercambio de nutrientes esenciales como N, P, K, Fe, Zn, Cu y Mn al incrementar la acumulación de elementos minerales en las plantas y sus granos (Smith y Read, 2008; Bücking *et al.*, 2012). Esto ocurre gracias a su capacidad para sintetizar promotores de crecimiento que optimizan el

aprovechamiento de estos elementos del suelo al establecer una relación simbiótica con la planta huésped (Smith y Read, 2008; Parniske, 2008), en la que la planta proporciona azúcares, aminoácidos y otras sustancias orgánicas a cambio de la movilización de estos nutrientes (Johansson *et al.*, 2004; Cozzolino *et al.*, 2013).

El maíz, como uno de los cereales de mayor importancia mundial, desempeña un papel fundamental en la alimentación humana y animal, así como en la seguridad alimentaria global (FAO, 2024). Garantizar su producción de manera sostenible es crucial para enfrentar los principales desafíos agrícolas, como el uso excesivo de agroquímicos y sus consecuencias ambientales. El uso de HMA ha demostrado mejorar la fisiología y el contenido mineral del maíz al incrementar su rendimiento y reducir la dependencia de productos químicos (Cozzolino *et al.*, 2013; Colina *et al.*, 2020). No obstante, la eficacia de los productos comerciales a base de HMA varía significativamente debido a limitaciones como baja concentración de inóculo micorrízico o información insuficiente sobre su composición (Johansson *et al.*, 2004; Srivastava *et al.*, 2017). Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de cuatro productos comerciales a base de HMA sobre variables fisiológicas y la acumulación de elementos minerales en el follaje y grano del cultivo de maíz, con la finalidad de proporcionar información útil al sector agrícola que permita fortalecer la sostenibilidad, mejorar el rendimiento de sus cultivos y reducir la dependencia de agroquímicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y condiciones ambientales del sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campus Uxmal, ubicado en el municipio de Muna, Yucatán, México (20°24'32.4"N y 89°45'30.9"O). El experimento se llevó a cabo durante

el 20 noviembre 2020 al 15 de marzo de 2021. Las condiciones climáticas locales durante este periodo fueron: temperatura media de 25.3 °C (máxima: 30.3 °C, mínima: 20.4 °C) y una precipitación acumulada de 557 mm. El contenido mineral del suelo en el sitio se describe en la Tabla 1.

Establecimiento del experimento

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Cada parcela experimental tuvo dimensiones de 12 m × 10 m. Se utilizaron semillas de la variedad de maíz Chichen Itzá. Previo a la siembra, las semillas de maíz fueron inoculadas con formulaciones comerciales de HMA. Para ello, se humedecieron ligeramente con 20 mL de agua por kg de semilla y luego se adicionó la cantidad respectiva de polvo de HMA, considerando 20 kg de semillas de maíz (aproximadamente 60.000 semillas) por hectárea y la tasa de campo (kg ha⁻¹) de formulaciones comerciales recomendadas por el fabricante. Los tratamientos y dosis de HMA utilizados se describen en la Tabla 2.

La fertilización del cultivo se realizó con urea y fosfato diamónico (dosis 150-80-00 N:P:K) en dos aplicaciones, la primera en el estadio V3 (tercera hoja con collar visible) y la segunda en V10 (décima hoja con collar visible), de acuerdo con la metodología de collar foliar descrita por Dodig et al. (2023). La fertilización se hizo de manera manual, depositando el fertilizante directamente a 7-10 cm de la base del tallo y a 3-5 cm de profundidad mediante el uso de un espeque metálico.

Evaluación de Parámetros fisiológicos en maíz inoculado con hongos micorrízicos arbusculares

Se determinó la fotosíntesis (A_N), conductancia estomática (g_s), CO₂ intercelular (C_i) y transpiración (E) mediante un analizador de gases infrarrojo (IRGA; LICOR, LI-6400, Lincoln, Nebraska, EE. UU). Las mediciones se realizaron en la hoja más joven completamente extendida de seis plantas centrales por parcela, utilizando una cámara foliar (6 cm²) acoplada a una fuente de luz roja/azul (LED 6400-02B). Cada hoja se midió cinco veces. La eficiencia en el uso de agua (EUA) se calculó como A_N / E (Garruña-Hernández et al., 2014). Adicionalmente, se evaluaron las unidades SPAD con un medidor portátil SPAD-502 (Minolta, Osaka, Japón). El medidor SPAD-502 se calibró antes de cada medición presionando la sonda sin muestra hasta que en la pantalla mostrara N = 0. Las mediciones se realizaron en tres hojas jóvenes completamente extendidas de cada una de las 15 plantas seleccionadas al azar de cada acceso, con cinco mediciones por hoja. Todas las mediciones se realizaron entre las 7:00 y las 10:00 horas en etapa del cultivo V6, a los 30 días después de la siembra (DDS), de acuerdo con la metodología propuesta por Ruiz-Santiago et al., (2024), adaptada a las condiciones del presente estudio.

Evaluación de acumulación de minerales en follaje y grano

La determinación y cuantificación de macro y microelementos en follaje (hojas) se realizó a los 35 y 75 días después de la siembra (DDS), mientras que en granos se llevó a cabo al momento de la cosecha, cuando presentaban aproximadamente 15 % de humedad. En ambos casos, el análisis se efectuó mediante μ -Fluorescencia de Rayos X (μ -XRF), utilizando un espectrómetro M4 Tornado 100 (Bruker, Alemania), conforme a la metodología descrita por Morales-Morales et al. (2019).

Tabla 1. Características y contenido de macro y microelementos del suelo.

	OM	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Mn
pH	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
7.56	2.66 %	24.3	30.8	746	2357	635	3.09	0.12	12.7

Tabla 2. Descripción de los HMA como tratamiento de semillas de maíz variedad Chichén Itzá.

Tratamientos	Nombre comercial (Concentración de esporas)	Espora	Dosis (Kg ha ⁻¹)	Fabricante
Biotech	Biotech MR (20.000 esporas kg ⁻¹)	<i>Glomus fasciculatum</i>	3 kg	Fagro Mexico
Glumix	Glumix (20.000 esporas kg ⁻¹)	5 especies del género <i>Glomus spp.</i>	3 kg	Biokrone S.A de C.V.
M-300	M-300 (300.000 esporas kg ⁻¹)	<i>Glomus intraradices</i>	0.5 kg	Mycoevolution
Suppra	Suppra (20.000 esporas kg ⁻¹)	Especies de los géneros <i>Entrophospera</i> , <i>Scutellospora</i> , <i>Glomus</i> , <i>Gigaspora</i>	6 kg	Mycorrhizas Suppra
Control	Sin aplicación	—	—	—

Las muestras foliares se obtuvieron a partir de 2 g de tejido molido, previamente secado y tamizado, colocadas en el portamuestra del equipo. En el caso del grano, se analizaron directamente ocho unidades por triplicado. Las mediciones se realizaron al vacío (20 mbar), con un haz colimador de 2 mm, tubo de rayos X operado a 50 kV y 200 μ A con filtro de 12.5 Å, y un detector de dispersión de energía XFlashTM (30 mm², 142 eV). Las fracciones de masa obtenidas se corrigieron con base en la biomasa total de cada tipo de muestra. Los minerales cuantificados fueron fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), manganeso (Mn), hierro (Fe) y zinc (Zn).

Análisis estadísticos

Se verificaron los supuestos de normalidad. En caso de que las variables no cumplieran con dichos supuestos, se aplicaron transformaciones: logaritmo natural para datos continuos, raíz cuadrada para datos discretos y arcoseno de la raíz cuadrada para proporciones. Se realizó un análisis de varianza de dos vías (ANOVA de doble vía), considerando como factores el tratamiento y el efecto de bloque, ya que el experimento fue establecido bajo un diseño de bloques completamente al azar. Este análisis se aplicó tanto a los parámetros fisiológicos como a la acumulación de macro y microelementos en follaje y grano. Las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de $P < 0.05$ esto se realizó con el software estadístico InfoStat (Di Rienzo, 2020).

RESULTADOS

Parámetros fisiológicos en maíz inoculado con hongos micorrízicos arbusculares

En general, la inoculación con HMA mostró efectos significativos en los parámetros fisiológicos evaluados. Destacaron los tratamientos Biotech y M-300, con valores superiores de conductancia estomática (g_s) con $0.52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y $0.51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, concentración intercelular de CO_2 (C_i) con valores de $158.51 \text{ mmol mol}^{-1}$ y $161.31 \text{ mmol mol}^{-1}$ y eficiencia en el uso del agua (EUA) con $39.16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1}$ y $39.19 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1}$. Los valores de transpiración (E) y contenido de clorofila (SPAD) fueron similares entre todos los tratamientos evaluados (Tabla 3).

Contenido de macro y microelementos en follaje

En cuanto al contenido de macroelementos, a los 35 días después de DDS, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos y el control para el caso de P, K y Ca. En cuanto al Fósforo (P), las plantas inoculadas con Glumix presentaron mayor contenido de P ($252.32 \text{ mg kg}^{-1}$) que las del control. Para el Potasio (K), las plantas inoculadas con M-300 y Suppra presentaron los valores más altos con $42479.71 \text{ mg kg}^{-1}$ y $40768.58 \text{ mg kg}^{-1}$. Para el caso del Calcio (Ca), las plantas del tratamiento M-300 y Suppra tuvieron valores más altos, con $240.20 \text{ mg kg}^{-1}$ y $225.88 \text{ mg kg}^{-1}$. No se observó efecto significativo de los inoculantes en el contenido de S, Mg y Na en el follaje de maíz (Tabla 4).

Tabla 3. Efecto de la inoculación de semillas con HMA comerciales sobre el intercambio de gases en maíz a los 35 días después de la siembra (etapa de crecimiento V6).

Tratamientos	Fotosíntesis ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (A_N)	Conductancia estomática ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (g_s)	CO_2 intercelular (mmol mol^{-1}) (C_i)
Biotech	46.6 ± 5.6^a	0.52 ± 0.11^a	158.51 ± 18.06^a
Glumix	44.8 ± 6.08^{ab}	0.47 ± 0.15^b	151.28 ± 31.19^{ab}
M-300	46.8 ± 4.7^a	0.51 ± 0.11^a	161.31 ± 22.58^a
Suppra	43.9 ± 6.6^b	0.43 ± 0.13^b	145.32 ± 25.23^b
Control	44.3 ± 7.5^{ab}	0.46 ± 0.14^b	150.25 ± 26.76^b
<i>p</i> value	0.0039	0.0001	0.0006
Tratamientos	Transpiración ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (E)	Eficiencia de uso del agua ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) (EUA)	Clorofila (SPAD)
Biotech	7.66 ± 1.12	39.16 ± 4.67^a	47.05 ± 3.65
Glumix	7.07 ± 1.17	37.76 ± 5.02^{ab}	46.58 ± 4.96
M-300	7.67 ± 1.29	39.19 ± 3.89^a	45.86 ± 4.28
Suppra	7.42 ± 1.56	36.52 ± 5.35^b	45.93 ± 3.85
Control	7.53 ± 1.74	36.81 ± 5.97^b	47.56 ± 3.31
<i>p</i> value	<i>n.s</i>	0.0007	<i>n.s</i>

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$), medias $\pm$ E.E. *n.s* = no significativo.

A los 75 DDS, sólo se observó efecto de los inoculantes en el contenido de Azufre (S) y Magnesio (Mg). Las plantas del tratamiento Suppra presentaron valores más altos de S (300.4 mg kg^{-1}) y Mg ($2393.02 \text{ mg kg}^{-1}$) que el control. En los otros elementos minerales (P, K, Ca y Na) no se observó diferencia entre tratamientos (Tabla 4).

En cuanto al contenido de microelementos, a los 35 DDS, solo se observó efecto significativo en el contenido de Manganeseo (Mn). Las plantas inoculadas con M-300 presentaron los valores más altos (1119 mg kg^{-1}) de Mn respecto al control ($615.43 \text{ mg kg}^{-1}$). No se observaron efectos significativos de los inoculantes en el contenido de Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu) y Cloro (Cl) (Tabla 5). A los 75 DDS, solo se observó efecto significativo en el contenido de Cloro (Cl). Las plantas inoculadas con M-300 presentaron los valores

más altos de Cloro (Cl) ($2189.58 \text{ mg kg}^{-1}$) comparado con el control ($1462.04 \text{ mg kg}^{-1}$). No se observó efecto significativo de los inoculantes en el contenido de Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn) y Cobre (Cu) (Tabla 5).

Contenido de macro y microelementos en granos

Los tratamientos con HMA no tuvieron efectos significativos en la acumulación de los macroelementos del grano ($p > 0.05$) (Tabla 6). En todos los tratamientos el contenido de los macroelementos de plantas inoculadas fue similar al control. Los valores en Fósforo (P) fueron $4.488 - 4.844 \text{ mg kg}^{-1}$, Azufre (S) $0.896 - 1.885 \text{ mg kg}^{-1}$, Calcio (Ca) $4.782 - 5.098 \text{ mg kg}^{-1}$, Magnesio (Mg) $5.998 - 6.442 \text{ mg kg}^{-1}$ y Sodio (Na) $6.15 - 7.095 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabla 6).

Tabla 4. Efecto de la aplicación de HMA comerciales en el contenido de macroelementos en el follaje del maíz.

Tratamientos	P	K	S	Ca	Mg
Biotech	113.10 ± 14.63^b	30722.42 ± 1291.93^b	75.19 ± 7.33^b	177.96 ± 6.44^c	$509.39 \pm 104.$
Glumix	252.32 ± 26.05^a	40422.1 ± 1941.56^{ab}	236.35 ± 26.01^a	217.30 ± 4.14^{ab}	554.76 ± 81.90
M-300	202.89 ± 40.49^{ab}	42479.71 ± 3159.45^a	238.23 ± 72.46^a	240.20 ± 6.95^a	357.53 ± 104.81
Suppra	177.38 ± 17.22^{ab}	40768.58 ± 2292.26^a	116.30 ± 14.65^{ab}	225.88 ± 4.72^a	627.36 ± 203.90
Control	125.02 ± 13.19^b	39990.61 ± 1921.34^b	107.7 ± 3.45^{ab}	188.69 ± 8.27^{bc}	337.9 ± 221.51
<i>p</i> value	0.011	0.0186	0.0029	0.0001	<i>n.s</i>
Tratamientos	P	K	S	Ca	Mg
Biotech	5241.71 ± 138.79	434.97 ± 32.33	249.97 ± 11.50^{ab}	150.67 ± 9.04	1984.70 ± 124.63^{ab}
Glumix	6055.15 ± 35.86	621.31 ± 18.30	260.32 ± 3.47^{ab}	210.53 ± 7.81	2174.35 ± 11.02^{ab}
M-300	5633.82 ± 491.81	870.55 ± 154.76	248.28 ± 16.24^{ab}	246.75 ± 52.32	1387.64 ± 71.43^{ab}
Suppra	5866.75 ± 130.46	481.79 ± 43.88	300.4 ± 6.91^a	160.02 ± 8.36	2393.02 ± 36.50^a
Control	5700.55 ± 179.35	625.86 ± 13.71	219.01 ± 5.88^b	191.2775 ± 5.03	1428.21 ± 68.20^b
<i>p</i> value	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>	0.0037	<i>n.s</i>	0.015

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$), medias $\pm$ E.E. *n.s* = no significativo.

Tabla 5. Efecto de la aplicación de HMA comerciales en el contenido de microelementos en el follaje del maíz.

Tratamientos	Fe	Zn	Mn	Cu	Cl
35 DDS					
mg kg^{-1}					
Biotech	18.72 ± 0.36	--	875.88 ± 31.80^{ab}	61.04 ± 4.96	1440.28 ± 70.86
Glumix	21.40 ± 0.62	--	992.30 ± 40.71^{ab}	64.20 ± 1.88	1718.67 ± 63.61
M-300	22.05 ± 0.87	--	1119.83 ± 178.38^a	66.16 ± 2.61	1838.44 ± 154.71
Suppra	21.55 ± 0.44	--	1016.71 ± 155.58^{ab}	58.68 ± 1.33	1617.39 ± 180.31
Control	21.29 ± 0.69	--	615.43 ± 48.21^b	63.87 ± 3.16	1757.66 ± 106.04
<i>p</i> value	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>	0.0389	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>
Tratamientos	Fe	Zn	Mn	Cu	Cl
75 DDS					
mg kg^{-1}					
Biotech	846.91 ± 234.90	84.69 ± 6.32	113.41 ± 3.39	19.04 ± 0.60	1561.98 ± 147.66^b
Glumix	711.69 ± 4.5149	100.125 ± 1.33	140.17 ± 1.87	20.025 ± 0.26	1191.75 ± 20.92^b
M-300	646.37 ± 75.15	92.27 ± 5.29	150.16 ± 29.80	19.475 ± 0.90	2189.58 ± 152.89^a
Suppra	441.64 ± 14.85	84.92 ± 6.64	103.69 ± 7.07	18.775 ± 0.43	649.03 ± 29.00^c
Control	522.53 ± 41.70	91.3625 ± 1.86	123.30 ± 4.52	18.27 ± 0.37	1462.04 ± 55.02^b
<i>p</i> value	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>	0.00001

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$), medias $\pm$ E.E. *n.s* = no significativo.

Tabla 6. Efecto de la aplicación de HMA comerciales el contenido de macroelementos minerales en el grano de maíz.

Tratamientos	P	S	Ca	Mg
Biotech	4.48 ± 0.14	0.89 ± 0.45	4.78± 0.29	6.38± 0.15
Glumix	4.77 ± 0.18	1.72 ± 11	4.72± 0.23	6.04± 0.12
M-300	4.84 ± 0.05	1.25 ± 0.36	4.68± 0.18	6.06± 0.18
Suppra	4.67 ± 0.03	1.31 ± 0.38	5.00± 0.06	5.99± 0.19
Control	4.79 ± 0.10	1.88 ± 0.08	5.09± 0.19	6.44± 0.19
<i>p</i> value	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$), medias $\pm$ E.E. *n.s* = no significativo.

La inoculación con HMA tampoco tuvo efectos significativos en la acumulación de microelementos en el grano. Únicamente se observó que el Manganese (Mn) presentó una disminución significativa con respecto al control ($p < 0.001$) en el tratamiento Biotech (Tabla 7). Las plantas inoculadas con Biotech presentaron una disminución significativa de Mn (2.366 mg kg^{-1}) comparada con el control (3.851 mg kg^{-1}). No hubo efecto de la inoculación en el contenido de Hierro (Fe), Zinc (Zn) y Cloro (Cl) (Tabla 7).

DISCUSIÓN

En el presente estudio se evaluaron los efectos de la inoculación de semillas de maíz con formulaciones comerciales de HMA sobre su fisiología y la acumulación de macro y microelementos minerales en las hojas y los granos. Los principales hallazgos indican que la inoculación con HMA mejoró los valores de las variables fisiológicas y promovió la acumulación de contenido mineral en el follaje de las plantas inoculadas. A los 35 y 75 DDS se observó una mayor acumulación de los macroelementos P, K, S, Ca y Mg, así como de los microelementos Mn y Cl. Sin embargo, con respecto al contenido mineral del grano, tanto en macro como en microelementos, la aplicación de HMA no mostró efectos significativos positivos. Este estudio ofrece una perspectiva de los beneficios de los HMA en la nutrición del cultivo de maíz y sus efectos en el contenido de elementos minerales en follaje.

Parámetros fisiológicos en maíz inoculado con hongos micorrízicos arbusculares

Respecto a los parámetros fisiológicos, la inoculación incrementó significativamente la conductancia estomática, carbono intercelular y la eficiencia del uso del agua (EUA) en las plantas inoculadas con Biotech y M-300. Estos resultados concuerdan con literatura científica sobre el papel crucial de los hongos micorrízicos en la absorción de agua y la condición fisiológica de las plantas (Smith y Read, 2008; Augé, 2001). Esta mejora en la EUA podría deberse a la capacidad de los HMA para establecer una simbiosis directa con las raíces del maíz, que forman estructuras especializadas como arbusculos e hifas externas, las cuales extienden considerablemente la zona de exploración radicular más allá de la rizosfera directa para aumentar la superficie efectiva de absorción de agua y nutrientes (Bennet y Groten, 2022). Este mecanismo es particularmente relevante en suelos someros y con distribución irregular de agua, como ocurre en los suelos de Yucatán (Shi *et al.*, 2020; Bautista *et al.*, 2015). En tales condiciones, la simbiosis micorrízica optimiza la adquisición hídrica y reduce el estrés por déficit de agua, lo que permite una mayor fijación de moléculas de carbono por cada molécula de agua liberada durante la transpiración, lo que permite una mejor EUA (Valentine *et al.*, 2013; Oljira *et al.*, 2020).

Tabla 7. Efecto de la aplicación HMA comerciales en el contenido de microelementos minerales (mg kg^{-1}) en el grano de maíz.

Tratamientos	Fe	Zn	Mn	Cl
Biotech	2.71 ± 0.80	1.25 ± 0.62	2.36 ± 0.29 ^b	1.74 ± 0.10 ^c
Glumix	2.29 ± 0.36	2.24 ± 0.52	3.50 ± 0.07 ^a	2.24 ± 0.26 ^{bc}
M-300	1.65 ± 0.50	2.54 ± 0.23	3.75 ± 0.11 ^a	3.23 ± 0.15 ^a
Suppra	2.59 ± 0.31	2.71 ± 0.25	3.71 ± 0.08 ^a	2.46 ± 0.21 ^{abc}
Control	2.78 ± 0.18	2.68 ± 0.16	3.85 ± 0.23 ^a	2.68 ± 0.08 ^{ab}
<i>p</i> value	<i>n.s</i>	<i>n.s</i>	0.001	0.002

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticas significativas, Tukey ($p \leq 0.05$), medias $\pm$ E.E. *n.s* = no significativo.

No obstante, los tratamientos Glumix y Suppra no presentaron mejoras significativas en estas variables, posiblemente debido a las diferencias en la composición de los inóculos micorrízicos. Cada producto contiene diferentes especies y/o cepas de HMA, las cuales pueden variar en su capacidad de colonización, especificidad de hospedero y eficacia en la mejora de la absorción de agua. Otra posible explicación es la existencia de una incompatibilidad entre las especies de HMA presentes en Glumix y Suppra con el genotipo específico de maíz utilizado en el estudio, o bien, con las condiciones edafoclimáticas locales. La interacción tripartita entre el hongo, la planta y el ambiente es compleja y puede influir en el establecimiento y la funcionalidad de la simbiosis micorrízica.

Contenido mineral en hojas

Diversos estudios han reportado la presencia de una amplia gama de macro y microelementos esenciales en las hojas y granos de maíz, como Ca (calcio), N (nitrógeno), Co (cobalto), Se (selenio), Zn (zinc), Cu (cobre), Fe (hierro), Mn (manganeso), Mo (molibdeno), Mg (magnesio), K (potasio), Na (sodio), Ba (bario) y Al (aluminio) (Rouf Shah et al., 2016; Qamar et al., 2017; Jaradat y Goldstein, 2018). Estos elementos desempeñan roles cruciales en múltiples procesos fisiológicos de las plantas, como la fotosíntesis, el metabolismo energético y la formación de estructuras celulares, además de ser fundamentales para la nutrición humana. En el presente estudio, el análisis de macroelementos en las hojas reveló diferencias significativas entre los tratamientos en ambas fechas de evaluación (35 y 75 DDS), con diferencias más pronunciadas a los 35 DDS para los elementos P, K, S y Ca. El follaje de las plantas tratadas con Glumix, M-300 y Suppra mostraron las mayores concentraciones de estos elementos en comparación con el Control sin inoculación. Esta mayor acumulación de macroelementos en las etapas iniciales del desarrollo podría explicarse por la alta demanda de nutrientes durante las primeras fases de crecimiento del maíz.

Numerosos estudios han demostrado que la mayor acumulación de macro y microelementos en maíz sucede antes de la floración. Entre los 30 y 55 DDS, las plantas absorben aproximadamente el 80 % del N, más del 50 % del P y cerca del 75 % del K requerido durante su desarrollo (Fallas et al., 2011; Sánchez et al., 2014). Nuestros resultados concuerdan con esta tendencia y sugieren que la inoculación con HMA podría haber potenciado la absorción de estos nutrientes en esta etapa crucial. Estos macroelementos son fundamentales para el desarrollo vegetal: el P participa en la transferencia energética y síntesis de ácidos nucleicos; K regula la apertura estomática, lo que influye directamente en la transpiración y

absorción de agua; el S integra aminoácidos esenciales y proteínas y el C es vital para la integridad estructural de las células vegetales (Espinoza, 2001; Niassy et al., 2021). De este modo, la inoculación con HMA mejora especialmente la absorción de nutrientes en etapas tempranas del cultivo, gracias a una asociación mutualista donde las plantas aportan carbohidratos a los hongos, mientras estos, a través de su extensa red de hifas, aumentan la capacidad de las raíces para explorar un mayor volumen de suelo y acceder a nutrientes esenciales, incluyendo aquellos de baja movilidad como el P, lo que resulta en un mejor establecimiento vegetal y potencialmente mayor rendimiento del cultivo (Valentine et al., 2013). En el caso de algunos nutrientes, como Mn y Fe, se registraron errores estándar relativamente altos, atribuibles a la variación natural en su solubilidad y movilidad, la cual depende de microvariaciones en el pH, el estado redox y las interacciones iónicas en el suelo (Millaleo et al., 2010). Además, la heterogeneidad espacial de los suelos kársticos, someros y pedregosos característicos de Yucatán (Bautista et al., 2015), junto con las diferencias en el grado de colonización y funcionalidad de los HMA, que modulan la adquisición de nutrientes (Smith et al., 2011). Por lo tanto, se atribuye la mayor parte de la variación a factores biológicos y edáficos.

Contenido mineral en granos

En contraste, la concentración mineral en los granos no mostró diferencias significativas después de la inoculación con HMA. Las concentraciones de macroelementos observadas en los granos en nuestro estudio fueron menores en comparación con las reportadas en trabajos realizados en Estados Unidos y Pakistán (Qamar et al., 2017; Jaradat y Goldstein, 2018). En el caso de los microelementos, únicamente el Mn mostró concentraciones similares a las de dichos estudios. Esta discrepancia sugiere que las características físico-químicas del suelo estudiado podrían haber influido en la acumulación de nutrientes del grano. Según Castellanos et al. (2000), el pH y el contenido de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn y Mn presente en el suelo se clasificaron dentro del rango de alto a muy alto. De este modo, la alta disponibilidad de nutrientes en el suelo podría haber reducido la dependencia de las plantas de la simbiosis micorrízica para la adquisición de nutrientes, ya que, en condiciones de alta fertilidad, las raíces de las plantas pueden acceder fácilmente a los nutrientes del suelo, lo que disminuye la necesidad de la ayuda de los HMA.

Por otro lado, este exceso de nutrientes en el suelo podría haber limitado su disponibilidad y traslocación hacia los granos, debido a diversos mecanismos, como movilidad limitada de ciertos elementos en condiciones de alta concentración y competencia entre cationes por los sitios de absorción en las raíces

(Tisdale *et al.*, 1993; Shi *et al.*, 1999; Zamudio *et al.*, 2015). Estudios sobre el cultivo de maíz han demostrado que el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados no solo disminuye la acumulación de macro y microelementos como K, Na, Mg, Ca, Zn, Cu, Fe y Mn en el grano (Xie *et al.*, 2007; Yu-Kui *et al.*, 2009), sino que también puede tener un impacto negativo en las poblaciones de hongos micorrízicos en los suelos y limitar su potencial (Colina *et al.*, 2020). Este último punto es crucial, ya que sugiere una interacción compleja entre la fertilización, la simbiosis micorrízica y la nutrición de las plantas. Un manejo adecuado de la fertilización puede prevenir desequilibrios que afecten negativamente la absorción de nutrientes y optimizar los beneficios potenciales asociados con la inoculación con HMA. En nuestro caso, el alto nivel de nutrientes en el suelo podría haber enmascarado los efectos positivos de la inoculación con HMA en el contenido mineral del grano.

CONCLUSIÓN

Los resultados del presente estudio muestran que la inoculación de semillas de maíz con HMA tiene efectos diferenciales sobre los parámetros fisiológicos y acumulación de minerales en follaje. Los tratamientos Biotech y M-300 destacaron significativamente al mejorar la conductancia estomática (gs), la concentración intercelular de CO₂ (Ci) y la eficiencia en el uso del agua (EUA). Por otro lado, los tratamientos Glumix, M-300 y Suppra favorecieron una mayor acumulación de fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn) y cloro (Cl) en las hojas. Estas diferencias subrayan la importancia de seleccionar agroinsumos que contengan HMA según los objetivos agronómicos: Biotech para regiones con limitaciones hídricas y Glumix, M-300 y Suppra para mejorar la calidad nutricional del cultivo. Las condiciones del suelo pueden influir en la disponibilidad de nutrientes y en la efectividad de la inoculación. Se requieren estudios adicionales para evaluar la interacción entre la composición de estos productos y las condiciones específicas del suelo.

Acknowledgements

The authors thank CONAHCYT for the postgraduate scholarship to Torres Cab Walther Jesus. Thanks also to Tecnológico Nacional de México for the financial support to conduct this research (Grant 20815.24-P).

Funding. This work was funded by Tecnológico Nacional de México - Project 20815.24-P “Efecto de inoculantes microbianos en el comportamiento fisiológico y contenido mineral del maíz criollo”.

Conflict of interest. The authors declare there are no competing interests.

Compliance with ethical standards. The authors declare that all ethical standards were complied with.

Data availability. The data presented in this study are available on request from the corresponding author. (walthertorres@itconkal.edu.mx).

Author contribution statement (CRediT). A. Reyes-Ramírez and W. Torres-Cab – Conceptualization, methodology, visualization, writing and original draft., J.I. Tucuch-Haas – Conceptualization, visualization and writing., E. Ruiz-Sanchez, H. Ballina-Gómez, G.A. Lugo-García, C.J. Alvarado-López, R. Garraña-Hernández – Formal analysis, validation, writing, review and editing., J.C. Ahuatzin-Hernández and R.R. Ruiz-Santiago – Validation, writing, review and editing.

REFERENCES

- Augé, R.M., Toler, H.D., Sams, C.E. and Nasim, G., 2008. Hydraulic conductance and water potential gradients in squash leaves showing mycorrhiza-induced increases in stomatal conductance. *Mycorrhiza*, 18, pp. 115-121. <https://doi.org/10.1007/s00572-008-0162-9>
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T. and Aguilar, Y., 2015. Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán, México: Enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(6), pp. 303-315.
- Bennett, A.E. and Groten, K., 2022. The costs and benefits of plant–arbuscular mycorrhizal fungal interactions. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 649–672. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-124504>
- Bücking, H., Liepold, E. and Ambilwade, P., 2012. The role of the mycorrhizal symbiosis in nutrient uptake of plants and the regulatory mechanisms underlying these transport processes. *Plant Science*, 4, pp. 108-132. <http://dx.doi.org/10.5772/52570>
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C., 2020. InfoStat versión 2020. URL <http://www.infostat.com.ar>. In: Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
- Castellanos, J.Z., Uvalle-Bueno, J.X. and Aguilar-Santelises, A., 2000. Manual de interpretación de análisis de suelo y agua (2ª ed.). Colección Instituto de Capacitación para

- la Productividad Agrícola (INCAPA). San Miguel de Allende, Guanajuato, México, 226 pp.
- Chandrasekaran, M., Chanratana, M., Kim, K., Seshadri, S. and Sa, T., 2019. Impact of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Photosynthesis, Water Status, and Gas Exchange of Plants Under Salt Stress—A Meta-Analysis. *Frontiers in Plant Science*, 10, p. 457. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00457>
- Colina, E., Paredes, E., Gutiérrez, X. and Vera, M., 2020. Efecto de fertilización nitrogenada en maíz (*Zea mays* L.) sobre poblaciones de hongos micorrízicos, en Babahoyo. *Journal of Science and Research*, pp. 10-16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4424768>
- Cozzolino, V., Di Meo, V. and Piccolo, A., 2013. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi applications on maize production and soil phosphorus availability. *Journal of Geochemical Exploration*, 129, pp. 40-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.02.006>
- Dodig, D., Božinovic, S., Nikolić, A., Žorić, M., Vančetočić, J., Ignjatovic-Micić, D., Delić, N., Weigelt-Fischer, K., Altmann, T. and Junker, A., 2021. Dynamics of Maize Vegetative Growth and Drought Adaptability Using Image-Based Phenotyping Under Controlled Conditions. *Frontiers in Plant Science*, 12, p. 652116. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.652116>
- Espinoza, L., 2001. Growth and development. In L. Espinoza & J. Roos (Eds.), *Corn production handbook* (pp. 3–6). University of Arkansas, USDA and County Government Cooperating.
- Fallas, R., Bertsch, F., Echandi, C. and Henríquez, C., 2011. Caracterización del desarrollo y absorción de nutrientes del híbrido de maíz HC-57. *Agronomía Costarricense*, 35(2), pp. 33-47.
- FAO, 2024. Maize. Recuperado de <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/maize/es/>
- Garruña-Hernández, R., Orellana, R., Larqué-Saavedra, A. and Canto, A., 2014. Understanding the physiological responses of a tropical crop (*Capsicum chinense* Jacq.) at high temperature. *PLoS One*, 9(11), pp. e111402. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111402>
- Giovannetti, M. and Mosse, B., 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, pp. 489-500.
- Gong, M., Tang, M., Chen, H., Zhang, Q. and Feng, X., 2013. Effects of two *Glomus* species on the growth and physiological performance of *Sophora davidii* seedlings under water stress. *New Forests*, 44, pp. 399-408. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9349-1>
- Harris, D., Pacovsky, R.S. and Paul, E.A., 1985. Carbon economy of soybean-Rhizobium-Glomus associations. *New Phytologist*, 101, pp. 427–440. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1985.tb02849.x>
- Jakobsen, I. and Rosendahl, L., 1990. Carbon flow into soil and external hyphae from roots of mycorrhizal cucumber plants. *New Phytologist*, 115(1), pp. 77–83. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00924.x>
- Jaradat, A. and Goldstein, W., 2018. Diversity of maize kernels from a breeding program for Protein Quality III: Ionome Profiling. *Agronomy*, 53, pp. 956-976. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.07.0437>
- Jayne, B. and Quigley, M., 2014. Influence of arbuscular mycorrhiza on growth and reproductive response of plants under water deficit: a meta-analysis. *Mycorrhiza*, 24, pp. 109-119.
- Johansson, J.F., Paul, L.R. and Finlay, R.D., 2004. Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology*, 48, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.11.012>
- Koltai, H. and Kapulnik, Y., 2010. *Arbuscular mycorrhizas: physiology and function*. Dordrecht, the Netherlands: Springer.
- Ma, Y., 2014. Ectomycorrhizas with *Paxillus involutus* enhance cadmium uptake and tolerance in *Populus × canescens*. *Plant, Cell & Environment*, 37, pp. 627-642. <https://doi.org/10.1111/pce.12183>

- Majewska, M.L., Rola, K. and Zubek, S., 2017. The growth and phosphorus acquisition of invasive plants *Rudbeckia laciniata* and *Solidago gigantea* are enhanced by arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 27, pp. 83-94. <https://doi.org/10.1007/s00572-016-0729-9>
- Mena, A., Fernández, K., Olalde, V. and Serrato, R., 2013. Diferencias en la respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la inoculación con *Glomus cubense* (y. Rodr. & Dalpé) y con un conglomerado de especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA). *Cultivos Tropicales*, 34(2), pp. 12-5.
- Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A.G., Mora, M.L. and Alberdi, M., 2010. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(4), pp.470-481. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>
- Mirshad, P.P. and Puthur, J.T., 2016. Arbuscular mycorrhizal association enhances drought tolerance potential of promising bioenergy grass (*Saccharum arundinaceum* retz.). *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, p. 425. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5428-7>
- Morales-Morales, A.E., Andueza-Noh, R.H., Márquez-Quiroz, C., Benavides-Mendoza, A., Tun-Suarez, J.M., González-Moreno, A. and Alvarado-López, C.J., 2019. Caracterización morfológica de semillas de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) de la Península de Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(18), pp. 463-475. <https://doi.org/10.19136/era.a6n18.2171>
- Niassy, S., Agbodzavu, M.K., Kimathi, E., Mutune, B., Abdel-Rahman, E.F.M., Salifu, D. and Tonnang, H.E.Z., 2021. Bioecology of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith), its management and potential patterns of seasonal spread in Africa. *PLoS One*, 16(6), p. e0249042. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249042>
- Oljira, A.M., Hussain, T., Waghmode, T.R., Zhao, H., Sun, H., Liu, X., Wang, X. and Liu, B., 2020. Trichoderma enhances net photosynthesis, water use efficiency, and growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress. *Microorganisms*, 8(10), p. 1565. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101565>
- Parniske, M., 2008. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6, pp. 763-775. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1987>
- Qamar, S., Aslam, M., Huyop, F.Z. and Javed, M.A., 2017. A comparative study of the inorganic nutrients in different types of *Zea mays* L. using inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 27, pp. 1315-1320.
- Quiroga, G., Erice, G., Aroca, R., Zamarreño, Á.M., García-Mina, J.M. and Ruiz-Lozano, J.M., 2018. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and salicylic acid regulate aquaporins and root hydraulic properties in maize plants subjected to drought. *Agricultural Water Management*, 202, pp. 271-284. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.012>
- Ruiz-Lozano, J.M., Aroca, R., Zamarreño, Á.M., Molina, S., Andreo-Jiménez, B., Porcel, R. and López-Ráez, J.A., 2016. Arbuscular mycorrhizal symbiosis induces strigolactone biosynthesis under drought and improves drought tolerance in lettuce and tomato. *Plant, Cell & Environment*, 39, pp. 441-452. <https://doi.org/10.1111/pce.12631>
- Ruiz-Santiago, R.R., Ballina-Gómez, H.S., Ruiz-Sánchez, E., Martínez-Falcón, A.P., Andueza-Noh, R.H., Garruña-Hernández, R. and González-Moreno, A., 2024. Functional leaf traits of maize landraces with low and high susceptibility to damage by *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 44(4), pp.1953-1963. <https://doi.org/10.1007/s42690-024-01284-8>
- Rouf Shah, T., Prasad, K. and Kumar, P., 2016. Maize-A potential source of human nutrition and health: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), pp.1166995. <http://doi.org/10.1080/23311932.2016.1166995>
- Sánchez, B., Rasmussen, A. and Porter, J.R., 2014. Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Global Change Biology*, 20(2), pp. 408-417. <https://doi.org/10.1111/gcb.12389>
- Shi, J.Q., Ding, R.X., Liu, Y.Z. and Sun, Y.H., 1999. Acidification of soil by urea and fallen tea

- leaves. *Journal of Tea Science*, 19(1), pp. 7-12.
- Shi, Z., Zhang, J., Lu, S., Liand, Y. and Wang, F., 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi improve the performance of sweet sorghum grown in a Mo-contaminated soil. *Journal of Fungi*, 6(44), pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/jof6020044>
- Smith, S.E. and Read, D.J., 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press and Elsevier, London, UK.
- Smith, S.E., Jakobsen, I., Grønlund, M. and Smith, F.A., 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology*, 156(3), pp.1050–1057. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.111.174581>
- Srivastava, P., Saxena, B. and Giri, B., 2017. Arbuscular mycorrhizal fungi: green approach/technology for sustainable agriculture and environment. In *Mycorrhiza-nutrient uptake. Biocontrol, Ecorestoration*. Springer, pp. 355-386. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68867-1_20
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D. and Havlin, J.H., 1993. *Soil Fertility and Fertilizers* (5th ed.). New York, NY: Macmillan Publishing Company.
- Toljander, J.F., Santos-González, J.C., Tehler, A. and Finlay, R.D., 2008. Community analysis of arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria in the maize mycorrhizosphere in a long-term fertilization trial. *FEMS Microbiology Ecology*, 65, pp. 323-338. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00512.x>
- Valentine, A.J., Mortimer, P.E., Kleinert, A., Kang, Y. and Benedito, V.A., 2013. Carbon metabolism and costs of arbuscular mycorrhizal associations to host roots. In: Aroca, R. (ed.), *Symbiotic Endophytes*, vol. 37. Soil biology, pp. 233–252. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39317-4_12
- Xie, L.L., Weng, H.X., Hong, C.L. and Yan, A.L., 2007. Uptake of bok-choy and *Ipomoea aquatica* Forsk to iodine species. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 13(1), pp. 123-128.
- Yu-kui, R., Shi-ling, J., Fu-suo, Z. and Jian-bo, S., 2009. Effects of nitrogen fertilizer input on the composition of mineral elements in corn grain. *Agrociencia*, 43(1), pp. 21-27.
- Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Martínez Rodríguez, J.N., Celis Euan, D.I., Valdivia Bernal, R. and Zaragoza Esparza, J., 2015. Eficiencia agronómica de fertilización al suelo de macro nutrientes en híbridos de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), pp. 1557-1569.
- Zhu, X.C., Song, F.B., Liu, S.Q., Liu, T.D. and Zhou, X., 2012. Arbuscular mycorrhizae improves photosynthesis and water status of *Zea mays* L. under drought stress. *Plant, Soil and Environment*, 58(4), pp. 186-191. <http://doi.org/10.1007/s11032-011-9671-x>