

Mycorrhizal symbiosis and growth of sorghum plants irrigated with saline water

Simbiosis micorrízica y crecimiento de sorgo irrigado con agua salina

Arturo Díaz-Franco; Flor Elena Ortiz-Cháirez*; Martín Espinosa-Ramírez

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Río Bravo. Carretera Matamoros-Reynosa km 61, Río Bravo, Tamaulipas, C. P. 88900. México.
ortiz.flor@inifap.gob.mx (*Corresponding autor)

Abstract

Irrigating crops with saline water induces adverse effects on productivity and causes deterioration of agricultural soils. NaCl is the most important toxic salt that induces ionic and osmotic stress in plants. Consequently, plants require a greater effort to absorb water, which affects their growth. A study was conducted in a greenhouse to determine the symbiotic effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) Burize ST® and Micorriza INIFAP® (*Rhizophagus intraradices*) on sorghum hybrids 'Norteño' and 'Gstar 7609', subjected to irrigation with three levels of saline water (desalinated, medium and high, EC = 0.03, 2.30 and 4.54 dS·m⁻¹, respectively). Variables measured were chlorophyll (SPAD), plant height, stem diameter, shoot and root biomass, and mycorrhizal colonization. Except for colonization, which was not influenced by the water's salinity level, the values of the other variables decreased as the salt concentration in the water increased. The results indicated that, in general, higher growth and biomass yield were obtained in sorghum plants by the symbiotic association between the AMF Micorriza INIFAP and the sorghum 'Norteño' at the three salinity levels in the irrigation water.

Keywords: *Sorghum bicolor*, arbuscular mycorrhizal fungi.

Resumen

Los riegos de los cultivos con agua salina inducen detrimentos en la productividad, así como deterioro de los suelos agrícolas. El NaCl es la sal tóxica de mayor importancia que provoca estrés iónico y osmótico en las plantas, con un consecuente esfuerzo mayor para absorber el agua y que afecta su crecimiento. Se realizó un estudio en invernadero cuyo objetivo fue determinar los efectos simbióticos de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) Burize ST® y Micorriza INIFAP® (*Rhizophagus intraradices*) en los híbridos de sorgo 'Norteño' y 'Gstar 7609', sometidos a irrigación con tres niveles de agua salina (desalinizada, media y alta, CE = 0.03, 2.30 y 4.54 dS·m⁻¹, respectivamente). Las variables medidas fueron clorofila (SPAD), altura de planta, diámetro de tallo, biomasa aérea y radical, y colonización micorrízica. Con excepción de la colonización que no fue influenciada por el nivel de salinidad del agua, los valores de las demás variables decrecieron conforme se incrementó la concentración de sales en el agua. En general los resultados indicaron que se registró mayor crecimiento y rendimiento de biomasa en plantas de sorgo mediante la asociación simbiótica entre el HMA Micorriza INIFAP y el sorgo 'Norteño', en los tres niveles de salinidad en el agua de riego.

Palabras clave: *Sorghum bicolor*, hongos, micorrízicos, arbusculares.

Introduction

Among the main abiotic stress factors that cause adverse effects on crop growth and productivity are drought, salinity and extreme temperatures. In particular, one of the problems facing agriculture in arid and semi-arid regions is salinity, both in the soil and in the water. In Mexico, the distribution and extent of soils with salt problems is increasing in irrigated areas in arid zones; at the same time, the quality of the irrigation water in those areas is lowered due to excess salts (Martínez, López, Basurto, & Pérez, 2011). Furthermore, the use of constant irrigation with saline water adversely affects the physical and chemical properties of soils, and also reduces plant nutrition, growth and yield. The direct effects of salinity on plant growth are the result of toxicity by ions, whereas the indirect effects are caused by an osmotic imbalance (Al-Karaki, 2006; Cho et al., 2006; Tian, Feng, Li, & Zhang, 2004). Sodium chloride is the salt of greatest importance as a contaminant; this molecule, when ionized by water, produces Na and Cl ions, which are toxic and cause ionic and osmotic stress at the cellular level in plants (Chinnusamy, Jagendorf, & Zhu, 2005; Mansour & Salama, 2000). A high Na concentration displaces the Ca ions from the binding sites of the cell membrane in the root and alters its permeability, causing the exit of K from the cells and facilitating the entry of Na (Dodd, Guppy, Lockwood, & Rochester, 2010). The excessive concentration of Cl in plant tissue produces leaf burn, reduces photosynthesis and inhibits nitrate uptake (Villa, Catalán, & Inzunza, 2006; Zhu, 2001).

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are cosmopolitan rhizosphere microorganisms that colonize most land plants. Symbiosis by AMF is manifested in plants through different mechanisms that promote greater adaptation and growth under extreme environmental conditions, such as in eroded sites with low fertility and salinity problems, in sites in arid-semiarid zones or in sites with pollution problems due to various organic and inorganic agents (Ferrera-Cerrato & Alarcón, 2008; Smith & Read, 2008). Studies by Hajiboland (2013) have shown that the symbiotic activity of AMF induces tolerance to salt stress through various mechanisms such as a) inducing increased absorption of nutrients to the plant, b) resulting in less Na and Cl accumulation in the plant, c) providing a greater supply of osmosolutes, and d) generating high antioxidant enzyme activity. Inoculation of *Glomus* spp. in plants increased the concentration of K and decreased Na, compared to non-inoculated plants (Giri & Mukerji, 2004). Also, tolerance to salinity resulting from mycorrhizal colonization has been observed in maize (Feng et al., 2002), mung bean (Jindal, Atwal, Selchon, & Rattan, 1993), squash (Harris, Esqueda, Valenzuela, & Castellanos, 2011) and sorghum (Cho et al., 2006), through effects on osmoregulation or proline accumulation. However, the functionality of

Introducción

Dentro de los principales factores de estrés abióticos que causan efectos adversos en el crecimiento y productividad de los cultivos, se encuentran la sequía, salinidad y temperaturas extremas. En particular, uno de los problemas de la agricultura en las regiones áridas y semiáridas es la salinidad, tanto en el suelo como en el agua. En México, la distribución y extensión de suelos con problemas de sales se está incrementando en áreas de riego en zonas áridas; de forma paralela, la calidad del agua de riego en esas áreas es deteriorada debido al exceso de sales (Martínez, López, Basurto, & Pérez, 2011). Además, el uso del riego constante con agua salina, origina detrimentos en las propiedades físicas y químicas de los suelos, asimismo reducción en la nutrición, crecimiento y rendimiento de los cultivos. Los efectos directos de la salinidad en el crecimiento de las plantas, son el resultado de la toxicidad por iones y efectos indirectos por un desbalance osmótico (Al-Karaki, 2006; Cho et al., 2006; Tian, Feng, Li, & Zhang, 2004). El cloruro de sodio representa la sal de mayor importancia como contaminante, esta molécula al ser ionizada por el agua produce iones de Na y Cl, los cuales son tóxicos y originan estrés iónico y osmótico a nivel celular en las plantas (Chinnusamy, Jagendorf, & Zhu, 2005; Mansour & Salama, 2000). Una alta concentración de Na desplaza los iones de Ca de los sitios de enlace de la membrana celular en la raíz y altera su permeabilidad, lo que causa la salida de K de las células y favorece la entrada de Na (Dodd, Guppy, Lockwood, & Rochester, 2010). La concentración excesiva del Cl en el tejido vegetal produce quemaduras en las hojas, disminuye la fotosíntesis e inhibe la absorción de nitratos (Villa, Catalán, & Inzunza, 2006; Zhu, 2001).

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son microorganismos rizosféricos cosmopolitas que colonizan la mayoría de las plantas terrestres. La simbiosis por HMA se manifiesta en las plantas a través de diferentes mecanismos que promueven mayor adaptación y crecimiento en condiciones ambientales extremas como en sitios erosionados, con baja fertilidad, con problemas de salinidad, en sitios de zonas áridas-semiáridas o con problemas de contaminación por diversos agentes orgánicos e inorgánicos (Ferrera-Cerrato & Alarcón, 2008; Smith & Read, 2008). Estudios realizados por Hajiboland (2013), han demostrado que la actividad simbiótica de los HMA inducen tolerancia al estrés salino mediante diversos mecanismos como: a) inducir mayor absorción de nutrimentos a la planta, b) menor acumulación de Na y Cl en la planta, c) suministrar mayor provisión de osmosolutes y d) alta actividad de enzimas antioxidantes. La inoculación de *Glomus* spp. en las plantas incrementó la concentración de K y decreció el Na, comparado con plantas no inoculadas (Giri & Mukerji, 2004). Asimismo, la

symbiosis with AMF may vary depending on the strain and the susceptibility of the cultivar. Tian, Feng, Li, y Zhang (2004) found that the ability of AMF strains to protect plants from the effects of salinity can vary, even among those of the same species, depending on the mechanisms for Na and Cl absorption. Al-Karaki, Hammad, and Rusan, (2001) concluded that the beneficial effect of mycorrhization under saline irrigation conditions showed variations depending on the tomato cultivar. The purpose of this study was to determine the symbiotic effects of two commercial mycorrhizal inoculants on two sorghum hybrids subjected to irrigation with three levels of saline water.

Materials and methods

Greenhouse management

The experiment was set up in a greenhouse at the Río Bravo Experimental Station (CERIB), INIFAP, Río Bravo, Tamaulipas (25° 57' north latitude, 98° 01' west longitude; 25 masl), during the 2012 spring-summer cycle. The soil used was mixed with 10 % Termolita added. Soil properties where the sorghum plants grew were: 1.3 % organic matter, pH 8.1, electrical conductivity (EC) 1.5 dS·m⁻¹, 59 % sand, 18 % clay, 23 % silt; 33.5 N-NO₃, 23.1 P, 1063 K, in mg·kg⁻¹ of soil (Plenecassagne, Romero, & López, 1999). The soil was placed in a plastic tarp, then covered with it and finally sterilized with methyl bromide. Later 7-kg plastic bags (pots) were filled with this soil; no chemical fertilizer was applied.

Experimental setup

The plants were inoculated with Burize ST[®] (Buckman Laboratories, S.A de C.V.), *Rhizophagus intraradices* and Micorriza INIFAP[®] (General Terán Experimental Station, INIFAP), *R. intraradices*, both with ≥ 40 spores·g⁻¹. The AMF were inoculated before planting at a ratio of 3 g per bag and at a depth of ≈ 6 cm. The control did not take inoculant. The sorghum hybrids used were 'Norteno' and 'Gstar 7609.' The plants were subjected to irrigation with three levels of water salinity (EC) considered as: desalinated or low (0.03 dS·m⁻¹), medium (2.30 dS·m⁻¹) and high (4.54 dS·m⁻¹). The desalinated water was obtained from the Federal Electricity Commission's Río Bravo thermoelectric plant in Tamaulipas State. The high salinity water was obtained from the subsoil through a well located within the CERIB grounds. This water was diluted by 50 % with the desalinated water to obtain the medium salinity level. Salinity levels and other chemical properties of the water were determined with the methodology of Plenecassagne et al. (1999), Table 1. Irrigation was applied on a regular basis and the amount of water was standardized in each pot (0.5 L). The plants were maintained until the flag leaf phenological state.

tolerancia a la salinidad mediante colonización micorrízica se ha observado en maíz (Feng et al., 2002), frijol mungo (Jindal, Atwal, Selchon, & Rattan, 1993), calabacita (Harris, Esqueda, Valenzuela, & Castellanos, 2011) y sorgo (Cho et al., 2006), a través de efectos en la osmoregulación o en la acumulación de prolina. Sin embargo, la funcionalidad de la simbiosis con HMA puede variar según la cepa y la susceptibilidad del cultivar. Tian, Feng, Li, y Zhang (2004) determinaron que la capacidad de las cepas de HMA para proteger a las plantas de los efectos de la salinidad, pueden mostrar variaciones, inclusive de la misma especie, según los mecanismos para la absorción de Na y Cl. Al-Karaki, Hammad, y Rusan, (2001) concluyeron que el efecto benéfico de la micorrización en condiciones de irrigación salina, mostró variaciones según el cultivar de tomate. El propósito de este estudio fue determinar los efectos simbióticos de dos inoculantes micorrízicos comerciales en dos híbridos de sorgo sometidos a riegos con tres niveles de agua salina.

Materiales y métodos

Manejo de invernadero

El desarrollo experimental se estableció en un invernadero del Campo Experimental Río Bravo (CERIB), INIFAP, Río Bravo, Tamaulipas (25° 57' latitud norte, 98° 01' longitud oeste; 25 msnm), durante el ciclo primavera-verano 2012. El suelo utilizado se mezcló con termolita adicionada al 10 %. Las propiedades del suelo donde crecieron las plantas de sorgo fueron: 1.3 % de materia orgánica, pH 8.1, conductividad eléctrica (CE) 1.5 dS·m⁻¹, arena 59 %, arcilla 18 %, limo 23 %; 33.5 N-NO₃, 23.1 P, 1063 K, en mg·kg⁻¹ de suelo (Plenecassagne, Romero, & López, 1999). El suelo se puso en lona de plástico y se cubrió con la misma, se esterilizó con bromuro de metilo. Posteriormente con este suelo se llenaron bolsas de plástico (macetas) con capacidad de 7 kg y no se aplicó fertilización química.

Desarrollo experimental

Las plantas se inocularon con Burize ST[®] (Buckman Laboratories, S.A de C.V.), *Rhizophagus intraradices* y Micorriza INIFAP[®] (Campo Experimental General Terán, INIFAP), *R. intraradices*, ambos con ≥ 40 esporas·g⁻¹. Los HMA se inocularon antes de la siembra a razón de 3 g por bolsa y a una profundidad de ≈ 6 cm. El testigo no llevó inoculante. Los híbridos de sorgo utilizados fueron 'Norteno' y 'Gstar 7609'. Las plantas se sometieron a riegos con tres niveles de salinidad (CE) del agua considerados como: desalinizada o baja (0.03 dS·m⁻¹), media (2.30 dS·m⁻¹) y alta (4.54 dS·m⁻¹). El agua desalinizada se adquirió en la planta termoelectrica de la Comisión Federal de Electricidad de Río Bravo, Tam. El agua de salinidad alta se obtuvo del subsuelo a través de un pozo

Table 1. Salinity levels (EC) and other chemical properties of the irrigation water used.**Cuadro 1. Niveles de salinidad (CE) y otras propiedades químicas del agua utilizada en el riego.**

Salinity level/ Nivel de salinidad	EC (dS·m ⁻¹)/ CE (dS·m ⁻¹)	Cations (meq·L ⁻¹)/Cationes (meq·L ⁻¹)				Anions (meq·L ⁻¹)/Aniones (meq·L ⁻¹)			
		Ca	Mg	Na	K	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼
Desalinated/Desalinizada	0.03	0.01	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03
Medium/Media	2.30	4.03	3.49	14.93	0.22	1.30	5.31	11.00	5.63
High/Alta	4.54	8.14	7.14	29.70	0.40	2.51	10.47	21.00	11.42

Information and data analysis

Two chlorophyll, plant height and stem diameter measurements, at 10 readings per treatment, were conducted. Chlorophyll content was determined using the SPAD index (Minolta SPAD-502® portable meter) with readings made at 23 days after sowing (das) in developed leaves and at 47 das in the center of the flag leaf. Plant height and stem diameter measurements were made at 23 and 49 das respectively. At the end of the experiment the weight of the dry biomass, both shoot and root, obtained after drying in a circulating air oven at 60 °C for three days, was estimated. In the fresh roots of five plants per treatment, mycorrhizal colonization was determined based on the presence of the percentage of fungal structures within the root (Phillips & Hayman, 1970; McGonigle & Fitter, 1990). The experiment consisted of a completely randomized design with three water salinity levels, two AMF plus control treatments and two sorghum hybrids, forming a 3 x 3 x 2 full factorial arrangement with 10 replicates. The data were statistically analyzed using the SAS (SAS Inst., Cary, N.C.) package and the significance between the treatments and interactions was obtained using Tukey's test ($P < 0.05$).

Results

In most cases the sorghum hybrid, AMF and salinity level treatments produced significant effects on the variables studied. According to the statistical analysis, there were no significant interactions for plant height and stem diameter at 49 das and mycorrhizal colonization, indicating that the three factors are independent (Table 2). The hybrids x AMF interactions were significant for chlorophyll at 47 das ($P = 0.03$), plant height at 23 das ($P = 0.001$), stem diameter at 23 das ($P = 0.002$) and root biomass ($P = 0.001$). Hybrids and salinity interacted for chlorophyll at 23 and 47 das ($P = 0.003$ and 0.041), and plant height and stem diameter at 23 das ($P = 0.001$ and 0.002). The AMF x salinity interaction was significant for plant height at 23 das ($P = 0.001$), shoot ($P = 0.001$) and root ($P = 0.001$) biomass (Table 2).

At 49 das the greatest plant height was recorded in the 'Norteño' hybrid ($P = 0.001$), which was 4.5 cm higher than 'Gstar 7609.' Between the AMF, the greatest height was with Micorriza INIFAP ($P = 0.001$), which exceeded the control by 5.6 cm and whose height was

localizado dentro de los terrenos del CERIB. Esta agua se diluyó al 50 % con el agua desalinizada para obtener el nivel de salinidad media. Los niveles de salinidad y otras propiedades químicas del agua se determinaron con la metodología de Plenecassagne et al. (1999), Cuadro 1. Los riegos se aplicaron de forma regular y la cantidad de agua se uniformizó en cada maceta (0.5 L). Las plantas se mantuvieron hasta el estado fenológico de hoja bandera.

Información y análisis de datos

Se realizaron dos mediciones de clorofila, altura de planta y diámetro de tallo, en 10 lecturas por tratamiento. El contenido de clorofila se determinó mediante el índice SPAD (medidor portátil Minolta SPAD-502®) con lecturas hechas a los 23 días después de la siembra (dds) en hojas desarrolladas y a los 47 dds en el centro de la hoja bandera. Las mediciones de altura de planta y diámetro de tallo se hicieron a los 23 y 49 dds. Al final del experimento se estimó el peso de la biomasa seca tanto aérea como radical, obtenida después del secado en una estufa de aire circulante a 60 °C durante tres días. En las raíces frescas de cinco plantas por tratamiento, se determinó la colonización micorrízica en función a la presencia del porcentaje de las estructuras fúngicas dentro de la raíz (Phillips & Hayman, 1970; McGonigle & Fitter, 1990). El experimento consistió en un diseño completamente al azar con tres niveles de salinidad de agua, dos tratamientos de HMA más testigo y dos híbridos de sorgo, para formar un factorial completo 3 x 3 x 2 con 10 repeticiones. Los datos se analizaron estadísticamente mediante el paquete SAS (SAS Inst., Cary, N. C.) y la significancia entre los tratamientos e interacciones fue a través de Tukey ($P < 0.05$).

Resultados

En la mayoría de los casos los tratamientos de híbridos de sorgo, HMA y niveles de salinidad produjeron efectos significativos en las variables estudiadas. De acuerdo con el análisis estadístico no se observaron interacciones significativas para altura de planta y diámetro de tallo a 49 dds y la colonización micorrízica, lo que indica que los tres factores son independientes (Cuadro 2). Las interacciones híbridos x HMA fueron significativas para clorofila a 47 dds ($P = 0.03$), altura de

Table 2. Chlorophyll (SPAD), plant height (PH), stem diameter (SD), shoot biomass (B-a), root biomass (B-r) and mycorrhizal colonization (Col) in sorghum, related to the hybrid, mycorrhizal inoculant (AMF) and salinity levels in the irrigation water.

Cuadro 2. Clorofila (SPAD), altura de planta (Al-p), diámetro de tallo (D-t), biomasa aérea (B-a), biomasa radical (B-r) y colonización micorrízica (Col) en sorgo, relacionadas con el híbrido, inoculante micorrízico (HMA) y niveles de salinidad en el agua de riego.

Factors/Factores	SPAD		PH (cm)/Al-p (cm)		SD (mm)/D-t (mm)		B-a	B-r	Col
	23 das/ 23 dds	47 das/ 47 dds	23 das/ 23 dds	49 das/ 49 dds	23 das/ 23 dds	49 das/ 49 dds	(g)	(g)	(%)
Hybrids (H)/Híbridos (H)									
Gstar 7609	33.8 a*	27.1 b	31.4 a	49.8 b	6.2 b	10.1	28.4	4.4	56.8
Norteño	31.9 b	31.5 a	25.7 b	54.3 a	6.5 a	10.4	29.2	5.1	48.2
Dif.	0.001	0.001	0.001	0.001	0.032	0.169	0.294	0.072	0.315
AMF (M)/HMA (M)									
Burize ST	30.0 b	28.2 b	26.3 b	51.0 b	5.6 c	9.9 b	27.4 b	3.4 c	39.8 b
M-INIFAP	34.9 a	29.9 a	31.4 a	55.0 a	7.1 a	11.2 a	32.9 a	6.1 a	65.2 a
Control/Testigo	33.6 a	28.4 b	30.0 a	49.4 b	6.4 b	10.2 b	24.2 c	5.0 b	0.0 c
Dif.	0.001	0.012	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004	0.001
Salinity (S)/Salinidad (S)									
Low/Baja	34.5 a	29.2	28.8 a	58.4 a	7.5 a	12.6 a	35.9 a	6.5 a	33.9
Medium/Media	35.1 a	29.9	30.8 a	53.0 b	7.0 b	10.6 b	31.7 b	5.5 b	37.8
High/Alta	28.9 b	28.1	26.8 c	44.7 c	4.6 c	7.5 c	18.7 c	2.2 c	33.4
Dif.	0.001	0.137	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.509
H x M	0.233	0.03	0.001	0.061	0.002	0.690	0.546	0.001	0.267
H x S	0.003	0.041	0.001	0.184	0.005	0.138	0.228	0.077	0.602
M x S	0.865	0.398	0.001	0.068	0.283	0.071	0.001	0.001	0.535
H x M x S	0.057	0.086	0.071	0.186	0.074	0.285	0.562	0.081	0.403

*Averages with the same letter in each column do not differ significantly (Tukey, $P < 0.05$)

*Promedios unidos con igual letra en cada columna no difieren significativamente (Tukey, $P < 0.05$).

similar to 'Gstar 7609.' The same variable significantly ($P = 0.001$) decreased as the irrigation water salinity increased (Table 2).

No differences between hybrids for stem diameter at 49 das ($P = 0.169$), or for the production of shoot ($P = 0.294$) and root ($P = 0.072$) biomass were observed; however, Micorriza INIFAP showed the greatest stem diameter (11.2 mm; $P = 0.001$) and shoot biomass (32.9 g; $P = 0.002$). At the low salinity level (0.03 dS·m⁻¹), the largest stem diameter (12.6 mm; $P = 0.001$) was obtained, declining with increasing salinity level. It was clear that for both plant height and stem diameter, Burize ST was not different from the control (Table 2).

Mycorrhizal colonization was similar between hybrids ($P = 0.315$) and at the salinity levels ($P = 0.509$), averaging

planta a 23 dds ($P = 0.001$), diámetro de tallo a 23 dds ($P = 0.002$) y biomasa radical ($P = 0.001$). Los híbridos y salinidad interaccionaron para clorofila a 23 y 47 dds ($P = 0.003$ y 0.041), altura de planta y diámetro de tallo a 23 dds ($P = 0.001$ y 0.002). La interacción HMA x salinidad fue significativa para altura de planta a 23 dds ($P = 0.001$), biomasa aérea ($P = 0.001$) y radical ($P = 0.001$) (Cuadro 2).

A los 49 dds la mayor altura de planta se registró en el híbrido 'Norteño' ($P = 0.001$), el cual fue 4.5 cm superior a 'Gstar 7609'. Entre HMA, la mayor altura fue con Micorriza INIFAP ($P = 0.001$), que superó al testigo con 5.6 cm y cuya altura fue similar a 'Gstar 7609'. La misma variable decreció significativamente ($P = 0.001$) conforme se incrementó la salinidad del agua de riego (Cuadro 2).

Table 3. Chlorophyll (SPAD), plant height (PH), stem diameter (SD) and root biomass (B-r), with mycorrhizal inoculants (AMF) and the sorghum hybrids.**Cuadro 3. Clorofila (SPAD), altura de planta (Al-p), diámetro de tallo (D-t) y biomasa radical (B-r), con inoculantes micorrízicos (HMA) y los híbridos de sorgo.**

AMF/HMA	Hybrid/Híbrido	SPAD 47 das/47dds	PH (cm) 23 das/ Al-p (cm) 23 dds	SD (mm) 23 das/ D-t (mm) 23 dds	B-r (g)
Burize ST	Gstar 7609	26.5 bc*	26.1 c	5.7 b	4.8 c
	Norteño	27.9 bc	23.1 d	5.8 b	4.6 c
Micorriza INIFAP	Gstar 7609	28.3 b	33.7 a	6.9 ab	5.9 b
	Norteño	32.7 a	29.9 b	7.3 a	6.6 a
Control/Testigo	Gstar 7609	26.7 bc	26.4 c	6.2 b	4.7 c
	Norteño	25.4 c	25.2 cd	6.1 b	4.9 c

*Averages with the same letter in each column do not differ significantly (Tukey, $P < 0.05$).

*Promedios unidos con igual letra en cada columna no difieren significativamente (Tukey, $P < 0.05$).

Table 4. Chlorophyll (SPAD), plant height (PH) and stem diameter (SD) influenced by the salinity level in the irrigation water and the sorghum hybrids.**Cuadro 4. Clorofila (SPAD), altura de planta (Al-p) y diámetro de tallo (D-t) influenciados por el nivel de salinidad del agua de riego y los híbridos de sorgo.**

Salts/Sales ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	Hybrid/Híbrido	SPAD 23 das/23 dds	SPAD 47 das/47 dds	PH (cm) 23 das/ Al-p (cm) 23 dds	SD (mm) 23 das/ D-t (mm) 23 dds
0.03	Gstar 7609	34.9 a*	27.8 b	28.8 ab	7.7 a
	Norteño	34.2 a	31.2 a	28.0 ab	7.5 a
2.30	Gstar 7609	35.1 a	26.9 b	29.4 a	6.5 b
	Norteño	34.9 a	31.4 a	28.2 ab	6.5 b
4.54	Gstar 7609	31.0 b	24.1 c	27.0 b	4.5 d
	Norteño	26.5 c	26.4 b	24.0 c	5.1 c

*Averages with the same letter in each column do not differ significantly (Tukey, $P < 0.05$).

*Promedios unidos con igual letra en cada columna no difieren significativamente (Tukey, $P < 0.05$).

52.5 and 35 %, respectively. Between the AMF, significant ($P = 0.001$) variation occurred; the most colonization was for Micorriza INIFAP (65.2 %), which exceeded by 63 % the colonization induced by Burize ST (Table 2).

The highest chlorophyll index at 47 das and root biomass were recorded with the inoculation of Micorriza INIFAP and in the 'Norteño' hybrid, 32.7 SPAD and 6.6 g, respectively; likewise, Micorriza INIFAP increased stem diameter at 23 das in both hybrids. At 23 das the greatest plant height was obtained with Micorriza INIFAP in both hybrids, although 'Gstar 7609' was significantly higher, probably because the hybrid showed higher growth compared to 'Norteño' at that stage. Burize ST retained similar SPAD chlorophyll readings (47 das), plant height (23 das), stem diameter (23 das) and root biomass relative to the control (Table 3).

Sorghum hybrids at 23 das showed the highest and statistically similar chlorophyll index values, at low ($0.03 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) and medium ($2.30 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) salinity levels, averaging 34.7 SPAD, but at the high concentration

No se observaron diferencias entre los híbridos para el diámetro de tallo a 49 dds ($P = 0.169$), ni para la producción de biomasa aérea ($P = 0.294$) y radical ($P = 0.072$); no obstante la Micorriza INIFAP mostró el mayor diámetro de tallo (11.2 mm; $P = 0.001$) y biomasa aérea (32.9 g; $P = 0.002$); en el nivel de salinidad bajo ($0.03 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) se obtuvo el mayor diámetro de tallo (12.6 mm; $P = 0.001$) y se redujo al incrementarse el nivel de salinidad. Fue evidente que tanto para la altura de planta como el diámetro de tallo, Burize ST no fue diferente al testigo (Cuadro 2).

La colonización micorrízica fue semejante entre los híbridos ($P = 0.315$) y en los niveles de salinidad ($P = 0.509$), con promedio de 52.5 y 35 %, respectivamente; entre HMA se manifestó variación significativa ($P = 0.001$), la mayor colonización fue para Micorriza INIFAP (65.2 %), la cual superó en 63 % a la colonización inducida por Burize ST (Cuadro 2).

El mayor índice de clorofila a los 47 dds y biomasa radical, se registró con la inoculación de Micorriza

Table 5. Plant height (PH), stem diameter (SD) and shoot (B-a) and root (B-r) biomass in response to salinity levels in irrigation water and mycorrhizal inoculants (AMF).**Cuadro 5. Altura de planta (Al-p), diámetro de tallo (D-t) y biomasa aérea (B-a) y radical (B-r) en respuesta a niveles de salinidad en agua de riego e inoculantes micorrízicos (HMA).**

Salts/Sales (dS·m ⁻¹)	AMF/HMA	PH (cm) 23 das/ Al-p (cm) 23 dds	B-a (g)	B-r (g)
0.03	Burize ST	25.4 d*	30.7 c	5.8 b
	Micorriza INIFAP	37.2 a	40.7 a	7.9 a
	Control	24.7 de	32.1 c	5.7 b
2.30	Burize ST	25.3 d	26.8 de	5.6 b
	Micorriza INIFAP	30.6 b	35.2 b	6.9 ab
	Control/Testigo	27.5 c	30.4 c	6.0 b
4.54	Burize ST	23.3 e	15.7 f	1.7 d
	Micorriza INIFAP	27.7 c	23.4 e	3.5 c
	Control/Testigo	23.7 e	17.2 f	1.8 d

*Averages with the same letter in each column do not differ significantly (Tukey, $P < 0.05$).

*Promedios unidos con igual letra en cada columna no difieren significativamente (Tukey, $P < 0.05$).

(4.54 dS·m⁻¹) the 'Gstar 7609' hybrid was superior to 'Norteño.' By contrast, at 47 das and at low and medium salinity, the higher values for 'Norteño' stood out; however, with the high salinity level (4.54 dS·m⁻¹), 'Norteño' also surpassed 'Gstar 7609,' with 26.4 and 24.1 SPAD indices, respectively. At 23 das, plant height was similar in the hybrids with low and medium salinity, while stem diameter was significantly greater in both hybrids with the lowest salinity level and decreased with increasing salinity in the irrigation water (Table 4).

At all three water salinity levels, Micorriza INIFAP was able to promote greater plant height at 23 das and shoot biomass compared to Burize ST and the control, although the significant decreases in the values of the variables with increasing salt concentration were obvious. Similarly, in general for root biomass, Micorriza INIFAP significantly outperformed Burize ST and the control at all three salinity levels, with weights of 7.9, 6.9 and 3.5 g, respectively (Table 5).

Discussion

The overall results indicated that the response of the sorghum hybrids in terms of the plant characteristics evaluated in the first sampling, specifically at 23 das, showed variations that led to significant interactions in the chlorophyll, plant height and stem diameter variables. This response could be due to the faster growth rate observed at this stage with the 'Gstar 7609' hybrid, which averaged an additional 5.7 in height than 'Norteño.' However, outstanding promotion with the Micorriza INIFAP inoculation in the three variables was clearly evident.

In the second sampling, flag leaf state (47 das), Micorriza INIFAP increased the chlorophyll index in 'Norteno' and it also exceeded 'Gstar 7609' in the three irrigation

INIFAP y en el híbrido 'Norteño', 32.7 SPAD y 6.6 g, respectivamente; de la misma forma, Micorriza INIFAP incrementó el diámetro de tallo a 23 dds en ambos híbridos. A 23 dds la mayor altura de planta se obtuvo con Micorriza INIFAP en los dos híbridos aunque 'Gstar 7609' fue significativamente superior, probablemente debido a que el híbrido mostró mayor crecimiento respecto a 'Norteño' en esa etapa. Burize ST mantuvo similar clorofila SPAD (47 dds), altura de planta (23 dds), diámetro de tallo (23 dds) y biomasa radical con relación al testigo (Cuadro 3).

Los híbridos de sorgo a 23 dds mostraron los mayores valores y estadísticamente semejantes del índice de clorofila, en los niveles de salinidad baja (0.03 dS·m⁻¹) y media (2.30 dS·m⁻¹), promedio 34.7 SPAD, pero en la concentración alta (4.54 dS·m⁻¹) el híbrido 'Gstar 7609' fue superior a 'Norteño'. Por el contrario, a 47 dds y en la salinidad baja y media, destacaron significativamente los mayores valores para 'Norteño'; no obstante, con el nivel alto de salinidad (4.54 dS·m⁻¹) también 'Norteño' superó a 'Gstar 7609', con índices de 26.4 y 24.1 SPAD, respectivamente. A 23 dds, la altura de planta fue similar en los híbridos con salinidad baja y media, mientras que el diámetro de tallo fue significativamente mayor en ambos híbridos con el menor nivel de salinidad y disminuyó al aumentar la salinidad en el agua de riego (Cuadro 4).

En los tres niveles de salinidad del agua, Micorriza INIFAP fue capaz de promover mayor altura de planta a 23 dds y biomasa aérea comparada con Burize ST y testigo, aunque fueron notorios los decrementos significativos de los valores de las variables al incrementarse la concentración salina. De forma semejante, en general para la biomasa radical, Micorriza INIFAP destacó significativamente sobre Burize ST y testigo, en los tres niveles de salinidad con pesos de 7.9, 6.9 y 3.5 g, respectivamente (Cuadro 5).

water salinity levels. Several studies have indicated that AMF increase the chlorophyll content in crops subjected to salt stress, compared with non-inoculated plants (Rabie, 2005; Sheng et al., 2008; Zuccarini, 2007), although the effectiveness in the photosynthetic pigments by the AMF in the plants varies depending on the inoculated strain (Díaz, Ortiz, Lozano, Aguado, & Grageda, 2012; Tian et al., 2004). When two strains of *Glomus mosseae* (GM1 and GM2) were inoculated in saline and non-saline soil, GM1 showed a greater chlorophyll increase in cotton plants (Tian et al., 2004). The promotion in chlorophyll content could be linked in part to the effect of cytokinins in the plant, secreted in this case by AMF (Ruiz-Lozano & Aroca, 2010); according to Zahir, Asghar, & Arshad, (2001), in experiments with rice, there was an increase in yield and leaf content of N, P and K, after exogenous applications of cytokinins, which reaffirms the hypothesis that these hormones may be supplemented through mycorrhization.

Another factor related to chlorophyll content is the nutritional status of the plant. It has been documented that in AMF-host symbiosis, the absorption of nutrients in the plant is facilitated by the hyphal system (Al-Karaki, Hammad, & Rusan, 2001; Smith & Read, 2008). Carpio, Davies, Arnold, (2005) and Díaz, Alvarado, Ortiz, & Grageda, (2013) showed that mycorrhizal plants increased chlorophyll content and absorption of N, P, K, Fe and Zn, compared to non-mycorrhizal plants. This same phenomenon has been observed with salt stress: mycorrhizal plants recorded the highest levels of N, P, K, Ca, Cu, Fe and Zn, compared to plants without AMF (Al-Karaki, 2006; Ghanbar, Khajehzadeh, Afshari, Ghaffar, & Abbaspour, 2011; Rabie, 2005).

At 49 das, 'Norteño' exceeded 'Gstar 7609' in plant height, although there were no variations between the hybrids for stem diameter and shoot and root biomass. Inoculation with Micorriza INIFAP was where the most promotion in plant height, stem diameter and shoot and root biomass was recorded, in relation to Burize ST and the control, despite the fact both inoculants are formed with *R. intraradices*. The contribution of AMF to increased plant biomass is linked to the mechanism that leads to the production of phytohormones (Jindal et al., 1993; Smith & Read, 2008), although its modulation is due to the genotype-AMF strain interaction (Fernández et al., 2014). Tian et al. (2004) concluded that leaf biomass in cotton had a different effect when the symbiosis of two AMF strains of the same species was compared. The contribution in the production of plant biomass via AMF is due to better plant mineral nutrition. The results of this study are consistent with those reported by Pecina, Díaz y Garza (2008), who evaluated the same inoculants in maize and recorded higher corn and grain yield with Micorriza INIFAP compared to Burize ST.

Discusión

Los resultados en general indicaron que la respuesta de los híbridos de sorgo a las características de planta evaluadas en el primer muestreo en particular, 23 dds, mostraron variaciones que originaron interacciones significativas en las variables clorofila, altura de planta y diámetro de tallo. Esta respuesta podría obedecer a la mayor velocidad de crecimiento observado en esa etapa con el híbrido 'Gstar 7609', cuyo promedio fue de 5.7 cm de altura sobre 'Norteño'. Sin embargo, fue tangible una sobresaliente promoción con la inoculación de Micorriza INIFAP en las tres variables.

En el segundo muestreo, estado de hoja bandera (47 dds), Micorriza INIFAP incrementó el índice de clorofila en 'Norteño' y éste también superó a 'Gstar 7609' en los tres niveles de salinidad en el agua de riego. Diferentes estudios han indicado que los HMA incrementan el contenido de clorofila en cultivos sometidos a estrés salino, comparado con plantas no inoculadas (Rabie, 2005; Sheng et al., 2008; Zuccarini, 2007). Aunque la efectividad en los pigmentos fotosintéticos por los HMA en las plantas varía según la cepa inoculada (Díaz, Ortiz, Lozano, Aguado, & Grageda, 2012; Tian et al., 2004). Cuando se inocularon dos cepas de *Glomus mosseae* (GM1 y GM2) en suelo salino y no salino, GM1 mostró mayor incremento de clorofila en plantas de algodón (Tian et al., 2004). La promoción en el contenido de clorofila pudiera estar vinculado en parte, al efecto de las citoquininas en la planta, secretadas en este caso por HMA (Ruiz-Lozano & Aroca, 2010); según Zahir, Asghar, & Arshad, (2001), en experimentos con arroz, existió aumento en el rendimiento y en el contenido foliar de N, P y K, después de aplicaciones exógenas de citoquininas; lo cual reafirma la hipótesis de que estas hormonas podrían ser suplementadas a través de la micorrización.

Otro factor relacionado con el contenido de clorofila es el estatus nutrimental de la planta. Está documentado que en la simbiosis HMA-hospedero se facilita la absorción de nutrimentos en la planta mediante el sistema de hifas (Al-Karaki, Hammad, & Rusan, 2001; Smith & Read, 2008). Carpio, Davies, Arnold, (2005) y Díaz, Alvarado, Ortiz, & Grageda, (2013) demostraron que las plantas micorrizadas incrementaron el contenido de clorofila y la absorción de N, P, K, Fe y Zn, comparado con plantas no micorrizadas. Este mismo fenómeno se ha observado con estrés salino, las plantas micorrizadas registraron los mayores niveles de N, P, K, Ca, Cu, Fe y Zn, respecto a plantas sin HMA (Al-Karaki, 2006; Ghanbar, Khajehzadeh, Afshari, Ghaffar, & Abbaspour, 2011; Rabie, 2005).

A los 49 dds, 'Norteño' superó en altura de planta a 'Gstar 7609', aunque no hubo variaciones entre los híbridos para el diámetro de tallo, biomasa aérea y

Also at 49 das, the salt concentration level in the irrigation water impacted plant height, stem diameter and shoot and root biomasses. The values of these variables decreased with increasing salinity level. The results coincide with those of Ghanbar et al. (2011), who obtained decreases in plant height and stem biomass in sorghum as the salt concentration in the soil increased. Likewise, in tomato (Al-Karaki et al., 2001), leaf area decreased as the salt concentration in the irrigation water increased. The symbiotic effect of Micorriza INIFAP by promoting greater shoot and root biomass at the three salinity levels was evident, outperforming both Burize ST and the control; in particular, the Micorriza INIFAP-‘Norteño’ association promoted increased root biomass production. Conversely, Ghanbar et al. (2011) reported no significant variation in root biomass in plants subjected to different soil salinity levels. The percentage of mycorrhizal colonization was similar between hybrids and salinity levels, although the highest value was with Micorriza INIFAP inoculation. Al-karaki et al. (2001) reported greater mycorrhizal colonization in the tomato cultivar ‘Pello,’ compared with ‘Marriha,’ under salt stress. On the other hand, the fact that mycorrhizal colonization was not influenced by the salinity level in the present study can be linked to other research showing inconsistencies in results between percentage of colonization and levels of salt concentration (Al-Karaki, 2006; Al-Karaki, et al. 2001; Rabie, 2005), probably due to intrinsic factors between salinity and AMF-host symbiosis.

In general, the results obtained at the three irrigation water salinity levels showed a better response in sorghum plants with Micorriza INIFAP inoculation, and in particular with the ‘Norteno’ hybrid, which may have some level of salinity tolerance. For salt stress conditions, Heikham, Kapoor, & Giri, (2009) indicated that AMF have different mechanisms to reduce the impact on plants, such as promoting the $K^+ : Na^+$ balance, proline accumulation and efficient water use by stomatal conductance, transpiration, water absorption and osmolyte accumulation. Tian et al. (2004) stressed that in order to increase plant growth and crop yield, it is necessary to select the AMF-genotype symbiotic functionality that shows the greatest effectiveness.

Conclusions

The results showed that there are differences in the symbiotic process of the two inoculated mycorrhizal fungi, which are evident in the manifestation of sorghum growth when interacting with the genotypes and the salinity levels in the irrigation water. However, the association between the AMF *R. intraradices* Micorriza INIFAP and the ‘Norteño’ hybrid, at all three salinity levels in the irrigation water, stood out. Root mycorrhizal colonization was not influenced by the salinity levels evaluated.

radical. La inoculación con Micorriza INIFAP, fue donde se registró la mayor promoción en altura de planta, diámetro de tallo, biomasa aérea y radical, en relación con Burize ST y testigo, no obstante a que ambos inoculantes están conformados con *R. intraradices*. La contribución de los HMA al aumento de la biomasa vegetal, se encuentra ligado al mecanismo que conlleva la producción de fitohormonas (Jindal et al., 1993; Smith & Read, 2008), aunque su modulación obedece a la interacción genotipo-cepa HMA (Fernández et al., 2014). Tian et al. (2004) concluyeron que la biomasa foliar en algodón tuvo un efecto diferente cuando comparó la simbiosis de dos cepas de HMA de la misma especie. La aportación en la producción de biomasa vegetal vía HMA se debe a una mejor nutrición mineral de las plantas. Los resultados del presente estudio son coincidentes con los reportado por Pecina, Díaz y Garza (2008), quienes evaluaron los mismos inoculantes en maíz y registraron mayor rendimiento de elote y grano con Micorriza INIFAP comparada con Burize ST.

También a los 49 dds, el nivel de concentración salina en el agua de riego impactó en la altura de planta, diámetro de tallo, y en las biomasa aérea y radical. Los valores de esas variables decrecieron al aumentar el nivel de salinidad. Los resultados coinciden con Ghanbar et al. (2011) quienes obtuvieron decrementos en la altura de planta y biomasa de tallo en sorgo, conforme se incrementó la concentración salina en el suelo. Igualmente, en tomate (Al-Karaki et al., 2001), el área foliar disminuyó al aumentar la concentración salina en el agua de riego. Resultó evidente el efecto simbiótico de Micorriza INIFAP al favorecer mayor biomasa aérea y radical en los tres niveles de salinidad, inoculante que superó a Burize ST y testigo; en particular la asociación Micorriza INIFAP-‘Norteño’ promovió la mayor producción de biomasa radical. Por el contrario, Ghanbar et al. (2011) no registraron variaciones significativas de biomasa radical en plantas sometidas a diferentes niveles de salinidad en el suelo. El porcentaje de colonización micorrízica fue semejante entre los híbridos y los niveles de salinidad, aunque el valor más alto fue con la inoculación de Micorriza INIFAP. Al-karaki et al. (2001) registraron mayor colonización micorrízica en el cultivar de tomate ‘Pello’, comparado con ‘Marriha’, en estrés salino. Por otro lado, el hecho de que la micorrización no fue influenciada por el nivel de salinidad en el presente estudio, se puede vincular a otras investigaciones que demuestran inconsistencias de resultados entre el porcentaje de colonización y niveles de concentración salina (Al-Karaki, 2006; Al-Karaki, et al. 2001; Rabie, 2005), probablemente debido a factores intrínsecos entre la salinidad y la simbiosis HMA-hospedero.

En general, los resultados obtenidos en los tres niveles de salinidad de agua de riego, demostraron mejor

Acknowledgments

The support provided by the *Fundación Produce Tamaulipas*, A. C. (Tamaulipas Producers' Foundation and the *Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal* (Plant Research, Promotion and Health Board) is appreciated.

End of English version

References / Referencias

- Al-Karaki, G. N. (2006). Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water. *Science Horticulture*, 109, 1-7.
- Al-Karaki, G. N., Hammad, R., & Rusan, M. (2001). Response of two tomato cultivars differing in salt tolerance to inoculation with mycorrhizal fungi under salt stress. *Mycorrhiza*, 11, 43-47.
- Al-Karaki, G. N., McMichael, B., & Zak, J. (2004). Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza*, 14, 263-269.
- Carpio, A. L., Davies, F. T., & Arnold, M.A. (2005). Arbuscular mycorrhizal fungi, organic and inorganic fertilizers: effect on growth and leachate of container-grown bush morning glory (*Ipomoea carnea* ssp. *fistulosa*) under high production temperatures. *Journal of American Society Horticulture Science*, 130, 131-139.
- Chinnusamy, V., Jagendorf, A., & Zhu, J. K. (2005). Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*, 45, 473-448.
- Cho, K., Toler, H., Lee, J., Ownley, B., Stutz, J. C., Moore, J. L., & Augé, R. M. (2006). Mycorrhizal symbiosis and response of sorghum plants to combined drought and salinity stresses. *Journal Plant Physiology*, 106, 517-528.
- Díaz, F. A., Alvarado, C. M., Ortiz, C. F., & Grageda, C. O. (2013). Nutrición de la planta y calidad de fruto de pimiento asociado con micorriza arbuscular en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4, 315-321.
- Díaz, F. A., Ortiz, C. F., Lozano, C. M., Aguado, S. G., & Grageda, C.O. (2012). Growth, mineral absorption and yield of maize inoculated with microbe strains. *African Journal Agriculture Research*, 28, 3764-3769.
- Dodd, K., Guppy, C., Lockwood, P., & Rochester, I. (2010). The effect of sodicity on cotton: plant response to solutions containing high sodium concentrations. *Plant and Soil*, 330, 239-249.
- Feng, G., Zhang, F. S., Li, X. L., Tian, C. Y., Tang, C., & Rangel, Z. (2002). Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza in related to higher accumulation of soluble sugars in roots. *Mycorrhiza*, 12, 185-190.
- Fernández, I., Morelos, M., López, R. J., Martínez, M. A., Ferrol, N., Azcón, C., Bonfante, P., Flors, V., & Pozo, M. J. (2014). Defense related phytohormones regulation in arbuscular mycorrhizal symbioses depends on the

respuesta del sorgo con la inoculación de Micorriza INIFAP, y en particular con el híbrido 'Norteño', el cual podría tener cierto nivel de tolerancia a la salinidad. Para condiciones de estrés por salinidad, Heikham, Kapoor, & Giri, (2009) indicaron diferentes mecanismos de los HMA para reducir los impactos en las plantas, como favorecer el balance K^+ : Na^+ , acumulación de prolina y el uso eficiente del agua mediante la conductancia estomatal, transpiración, absorción de agua y la acumulación de osmolitos. Tian et al. (2004) destacaron que para poder argumentar el crecimiento vegetal y rendimiento del cultivo, es necesario seleccionar la funcionalidad simbiótica HMA-genotipo que demuestre mayor efectividad.

Conclusiones

Los resultados demostraron que existen diferencias en el proceso simbiótico de los dos hongos micorrízicos inoculados, los cuales se evidencian en la manifestación del crecimiento del sorgo al interactuar con los genotipos y los niveles de salinidad en el agua de riego. No obstante destacó la asociación entre el HMA *R. intraradices* Micorriza INIFAP y el híbrido 'Norteño', en los tres niveles de salinidad en el agua de riego. La colonización micorrízica radical no fue influenciada por los niveles de salinidad evaluados.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de la *Fundación Produce Tamaulipas*, A. C. y al *Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal*.

Fin de la versión en español

- partner genotypes. *Journal of Chemical Ecology*. doi 10.1007/s10886-014-0473-6.
- Ferrera-Cerrato R., & Alarcón, A. (2008). Biotecnología de los hongos micorrízicos arbusculares. En: Díaz F.A.; Mayek P.N. (eds) *La Biofertilización como Tecnología Sostenible*. Plaza y Valdés/CONACYT. pp: 25-38.
- Ghanbar, L., Khajehzadeh, M. H., Afshari, H., Ghaffar, A.E., & Abbaspour, H. (2011). Effect of mycorrhiza symbiosis on the NaCl salinity in *Sorghum bicolor*. *African Journal of Biotechnology*, 10, 7796-7804.
- Giri, B., & Mukerji, K. G., (2004). Mycorrhizal inoculant alleviates salt stress in *Sesbania aegyptica* and *S. grandiflora* under field conditions: evidence for reduced sodium and improved magnesium uptake. *Mycorrhiza*, 14, 307-312.
- Hajiboland, R. (2013). Role of arbuscular mycorrhiza in amelioration of salinity. In: Ahmad P. (ed.). *Salt Stress in Plants: Signaling, Omics and Adaptations*. Springer Science Media. 301-337.
- Harris, V. C., Esqueda, M., Valenzuela, S. E., & Castellanos A. (2011). Tolerancia a sequía y salinidad en *Cucurbita*

- pepo* var. *pepo* asociada con hongos micorrízicos arbusculares del desierto Sonorense. *Agrociencia*, 45, 959-970.
- Heikham, E., Kapoor, R., & Giri, B. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. *Annals of Botany*, 104, 1263-1280.
- Jindal, V., Atwal A., Selchon, B. S., & Rattan, S. (1993). Effect of vesicular-arbuscular mycorrhizae on metabolism of mungbean plants under NaCl salinity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 31, 475-481.
- Mansour, M. M., & Salama, K. H. (2000). Cellular basis of salinity tolerance in plants. *Environment and Experimental of Botany*, 52, 113-122.
- Martínez, V. N., López, A. C., Basurto, S. M., & Pérez, L. R. (2011). Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia*, 3, 156-161.
- McGonigle, T. P., & Fitter, A. H. (1990). Ecological specificity of vesicular-arbuscular mycorrhizal associations. *Mycological Research*, 94, 120-122.
- Phillips, J., & Hayman, D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of Britany Mycological Society*, 55, 158-161.
- Pecina, Q. V., Díaz, F. A., & Garza, C. I. (2008). Respuesta del maíz y sorgo a la fertilización biológica. En: Díaz F.A.; Mayek P.N. (eds). *La Biofertilización como Tecnología Sostenible*. Plaza y Valdés/CONACYT. 208-211.
- Plenecassagne, A., Romero, F. E., & López, B. C. (1999). *Manual de laboratorio para análisis de suelo, planta y agua*. Instituto nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias. Gómez Palacio Durango, México. 236.
- Rabie, G. H. (2005). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and kinetin on the response of mungbean plants to irrigation with seawater. *Mycorrhiza*, 15, 225-230.
- Ruiz-Lozano, J., & Aroca, R. (2010). Host response to osmotic stresses: Stomatal behavior and water use efficiency of arbuscular mycorrhizal plants. In: Koltai H.; Kapulnik Y. (eds.). *Arbuscular Mycorrhiza: Physiology and Function*. Springer Science Media. 239-259.
- Sheng, M., Tang, M., Chen, H., Yang, B., Zhang, F., & Huang Y. (2008). Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. *Mycorrhiza*, 18, 287-296.
- Smith, G. S., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. Academic Press. London. 750.
- Tian, C. Y., Feng, G., Li, X. L., & Zhang, F. S. (2004). Different effects of arbuscular mycorrhizal fungal isolates from saline or no-saline soil on salinity tolerance of plants. *Applied Soil Ecology*, 26, 143-148.
- Villa, C. M., Catalán, V. E., & Inzunza, I. M. (2006). Absorción y translocación de sodio y cloro en plantas de chile fertilizadas con nitrógeno y crecidas en estrés salino. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 29, 79-88.
- Zahir, Z. A., Asghar, H. N., & Arshad, M. (2001). Cytokinin and its precursors for improving growth and yield of rice. *Soil Biochemistry*, 33, 05-408.
- Zhu, J. K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends Plant Science*, 6, 66-71.
- Zuccarini, P. (2007). Mycorrhizal infection ameliorates chlorophyll content and nutrient uptake of lettuce exposed to saline irrigation. *Plant Soil and Environment*, 53, 283-289.