

Nutrición mineral y rendimiento de sorgo inoculado con cepas microbianas en dos agroambientes

Mineral nutrition and yield of sorghum inoculated with microbe strains under two agroenvironments

Arturo Díaz Franco¹, Flor Elena Ortiz Cháirez^{1‡},
Oscar Arath Grageda Cabrera² y Emmanuel Fernández Cruz³

¹ Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. Carretera Matamoros-Reynosa km 61. 88900 Río Bravo, Tamaulipas, México.

[‡] Autora responsable (ortiz.flor@inifap.gob.mx)

² Campo Experimental Bajío, INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende km 6.5. 38010 Celaya, Guanajuato, México.

³ Campo Experimental General Terán, INIFAP. Carretera Montemorelos-China S/N, Cerca de Hacienda las Anacuas. 67400 Cd. Gral Terán, Nuevo León, México.

RESUMEN

Los inoculantes microbianos poseen gran importancia ecológica y económica en la agricultura. Se evaluó la efectividad agrobiológica de la inoculación de cepas microbianas en sorgo (D-47) cultivado en condiciones de riego y temporal. Fueron seis cepas experimentales de hongos micorrízicos arbusculares [3 (*Funneliformis mosseae*), 20 (*Gigaspora albida*), 32 (*F. mosseae*), 35 (*F. mosseae*), 39 (*F. mosseae*) y 55 (*Gigaspora albida*)], un consorcio de bacterias promotoras de crecimiento [*Pseudomonas* spp. (Bacteriano 2709)] (Ba), micorriza arbuscular INIFAP (*Rhizophagus intraradices*) (M) y testigo fertilizado (TF), con dosis de 60-40-00 y 120-40-00, para temporal y riego, respectivamente. Se midió clorofila (SPAD), nitrógeno (N), fósforo (P), hierro (Fe) y zinc (Zn) foliar, biomasa foliar y radical, colonización micorrízica y rendimiento de grano. Las cepas microbianas influyeron de forma diferente en las características de sorgo sembrado en los agroambientes. En general se observó mejor respuesta del sorgo en la condición de riego. El contenido de Zn, la colonización micorrízica y biomasa radical, no fueron influenciados por la condición de humedad. En riego, los mayores índices de clorofila fueron con TF y M; en la absorción de N destacaron TF, M y las cepas 3 y 32; los mayores valores de P se observaron con la cepa 35; para Fe sobresalió la cepa 32. Así mismo, el consorcio Bacteriano 2709 incrementó el Zn, mientras que en temporal fue

la cepa 39. La mayor colonización se registró en M y cepas 55, 39 y 35. En rendimiento de grano, las cepas 39, 3 y M, fueron competitivas con TF y superaron al resto de los tratamientos. Los resultados demostraron que la expresión del potencial de los inoculantes microbianos en la nutrición y rendimiento de sorgo, variaron en función a la cepa utilizada y a la condición de riego y temporal.

Palabras clave: micorriza arbuscular, rhizobacteria, Sorghum bicolor.

SUMMARY

Microbial inoculants have great ecological and economic importance in agriculture. We assessed the agrobiological effectiveness of inoculating microbial strains in sorghum (D-47) grown under irrigated and dryland conditions. Six experimental strains of arbuscular mycorrhizal fungi were evaluated [3 (*Funneliformis mosseae*), 20 (*Gigaspora albida*), 32 (*F. mosseae*), 35 (*F. mosseae*), 39 (*F. mosseae*) and 55 (*Gigaspora albida*)], as well as a consortium of growth promoting bacteria [*Pseudomonas* spp. (Bacterial 2709)] (Ba), INIFAP arbuscular mycorrhiza (*Rhizophagus intraradices*) (M) and a fertilized control (TF). The doses used were 60-40-00 and 120-40-00 for dryland and irrigation, respectively. Chlorophyll (SPAD), nitrogen (N), phosphorus (P), iron (Fe) and foliar zinc (Zn), and radical biomass, grain yield and

Cita recomendada:

Díaz Franco, A., F. E. Ortiz Cháirez, O. A. Grageda Cabrera y E. Fernández Cruz. 2018. Nutrición mineral y rendimiento de sorgo inoculado con cepas microbianas en dos agroambientes. Terra Latinoamericana 36: 229-238.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.295>

Recibido: julio de 2017. Aceptado: mayo de 2018.

Publicado en Terra Latinoamericana 36: 229-238.

mycorrhizal colonization were quantified. Microbial strains influenced the characteristics of sorghum planted in the agroenvironments differently. In general, sorghum had better response in irrigated conditions. Content of Zn, radical biomass and mycorrhizal colonization were not influenced by moisture conditions. Under irrigation, the highest rates of chlorophyll were found in TF and M; N uptake highlighted TF, M, and strains 3 and 32; the highest values of P were observed for strain 35; for Fe, strain 32 excelled. In irrigation, the bacterial consortium 2709 increased Zn, whereas in dryland it was strain 39. Greater mycorrhizal colonization occurred in M and strains 55, 39 and 35. In grain yield, M and strains 39 and 3 were competitive with TF and outperformed the rest of the treatments. Results showed that the expression of the potential of microbial inoculants on nutrition and sorghum yield, varied in function of the strain used.

Index words: *arbuscular micorrhizal fungi, rhizobacteria, Sorghum bicolor.*

INTRODUCCIÓN

El mercado globalizado, el impacto del cambio climático, la presión demográfica y la degradación del ambiente, ha hecho reconsiderar el estado actual de los sistemas de producción agrícolas. El exceso del uso de agroquímicos ha tenido como resultado contaminación, decremento de la biodiversidad en las regiones agrícolas, degradación de los agroecosistemas e incrementos de los costos de producción. La producción agrícola sostenible podría reemplazar a la agricultura tradicional, aunque para eso se requiere de una mayor comprensión y entendimiento de las interacciones biológicas dentro de los agroecosistemas (Lire *et al.*, 2017). Los inoculantes microbianos poseen en la actualidad gran importancia ecológica y económica en la agricultura. Con una perspectiva ambiental y la necesidad de un manejo sostenible de los sistemas agrícolas, la importancia del papel de los microorganismos se ha incrementado de manera prominente dentro de la conservación y la fertilidad de los suelos (Grageda *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2012). Es de gran importancia el uso de inoculantes microbianos que tengan efectividad sobre las plantas y con afinidad en la agroecología, aunque particularmente aquellos con factibilidad económica. Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y las bacterias promotoras de

crecimiento vegetal (BPCV), son microorganismos comunes utilizados como inoculantes (Sharma *et al.*, 2012; Xiang *et al.*, 2012). Dentro de la actividad simbiótica, los HMA manifiestan diferentes mecanismos que inducen a una mayor exploración del suelo a través de las hifas, disminuyen los efectos de condiciones abióticas adversas para la planta, producen fitohormonas que estimulan el crecimiento, facilitan la absorción de nutrientes, producen glomalina que adhiere las partículas del suelo, e inducen acción protectora contra algunos fitopatógenos del suelo (Smith y Read, 2008; Kim *et al.*, 2017). El grupo de BPCV puede estimular a las plantas a través de la síntesis y exportación de auxinas, giberelinas, citoquininas, etileno y ácido abscísico, fijación de N, o biocontrol de fitopatógenos mediante compuestos antifúngicos como sideróforos, enzimas líticas, entre otros (Compant *et al.*, 2010; Sangeeta *et al.*, 2017).

Diversos estudios se han enfocado a conocer los efectos de los microorganismos del suelo como biofertilizantes, utilizados para incrementar la producción (Hungria *et al.*, 2010; Díaz *et al.*, 2014a), sustituir o disminuir la fertilización química (Berruti *et al.*, 2015), conferir tolerancia contra fitopatógenos del suelo (Kollakkodan *et al.*, 2017), para biorremediación de suelos contaminados, así como proveer tolerancia a otros factores abióticos (Asmelash *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017). No obstante, algunas cepas de microorganismos benefician en mayor grado a un determinado hospedero comparado con otros, además de que su funcionalidad puede ser alterada bajo determinadas condiciones edafoclimáticas, hecho que muestra las marcadas diferencias existentes entre especies e incluso entre cepas de la misma especie (Hungria *et al.*, 2010; Montero *et al.*, 2010). Muchos inoculantes son preparados a partir de cepas microbianas introducidas o extranjeras, aunque actualmente se le ha dado énfasis a la utilización de cepas nativas, que puedan ser reintroducidas a través de su inoculación a los cultivos, con mayor capacidad de adaptación y efectividad en sitios y climas específicos (Hungria *et al.*, 2010; Kovadio *et al.*, 2017). De aquí la importancia de conocer la relación existente entre cepas microbianas potenciales y los sistemas de producción, con el fin de que la cepa seleccionada sea integrada dentro del modelo agronómico del cultivo.

En México, la mayor superficie de sorgo (*Sorghum bicolor*) se ubica en la región norte de Tamaulipas con 650 mil ha anuales, donde en muchos de los casos

se cultiva como monocultivo. Las limitaciones nutrimentales del sorgo se han atendido mediante la fertilización química. Aunque por el alto costo de los fertilizantes, no se adicionan o se utilizan dosis bajas. Ante este contexto, se ha resaltado la necesidad de desarrollar prácticas agronómicas que eleven la productividad del sorgo y promuevan un equilibrio en los agroecosistemas (Díaz *et al.*, 2016). Por lo que el objetivo del trabajo fue evaluar cepas microbianas de origen nacional para conocer su impacto en el crecimiento, nutrición y rendimiento de sorgo en condiciones de riego y temporal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localidades

Los estudios se desarrollaron durante 2010 en dos localidades del norte de Tamaulipas, en El Vaso, Matamoros (25° 53' 57" N, 97° 48' 49" O; 20 msnm), condición de temporal y con riego en el Campo Experimental Río Bravo, INIFAP (CERIB), Río Bravo (25° 57' 17" N, 98° 01' 5.1" O; 25 msnm). Previo a la siembra, se tomaron muestras de suelo a 30 cm de profundidad, para analizar las propiedades químicas y físicas (Cuadro 1). El pH se determinó en solución acuosa (1:2); la conductividad eléctrica (C.E.) con el porcentaje de saturación; la materia orgánica (M.O.) se midió con dicromato de potasio mediante la técnica de Walkley y Black; el NO₃-N se determinó mediante ácido salicílico; el P disponible se midió con el método de Olsen; y el K intercambiable por acetato de amonio (Plenecassagne *et al.*, 1999).

Manejo Experimental

El híbrido de sorgo manejado fue D-47 (comúnmente utilizado en la región), sembrado el 2 de febrero en el CERIB y el 8 de febrero de 2015 en El Vaso, a densidades recomendadas de 240 y

155 mil plantas ha⁻¹, respectivamente (INIFAP-CERIB, 2012). Los microorganismos evaluados fueron: a) BPCV, consorcio Bacteriano 2709 (compuesto por tres cepas de *Pseudomonas* spp.) (Ba), Campo Experimental Bajío, INIFAP, Celaya, Guanajuato; b) seis cepas de HMA experimentales del INIFAP, provenientes de colectas de regiones áridas y semiáridas del norte de México [3 (*Funneliformis mosseae*), 20 (*Gigaspora albida*), 32 (*F. mosseae*), 35 (*F. mosseae*), 39 (*F. mosseae*) y 55 (*Gigaspora albida*)] y una cepa micorriza arbuscular INIFAP (M) (*Rhizophagus intraradices*) del Campo Experimental General Terán, INIFAP, General Terán, N.L.; c) testigo fertilizado (TF), con dosis de 60N-40P-00K y 120N-40P-00K, para temporal y riego, respectivamente (INIFAP-CERIB, 2012); y d) testigo absoluto, no inoculado ni fertilizado. En condiciones de riego, la mitad del N se aplicó en presembrado y la otra mitad antes de floración. Los HMA con ≥ 60 esporas g⁻¹ de suelo, se inocularon en la semilla a dosis de 1 kg ha⁻¹. Las BPCV crecieron en medio de cultivo extracto de levadura manitol en forma líquida hasta alcanzar la fase estacionaria, ésta fase se determinó mediante densidad óptica usando espectrofotómetro y recuento celular con cámara de 0.1 mm (Neubauer). Se obtuvo una concentración de 1×10^8 UFC g⁻¹, posteriormente, el cultivo se colocó en un soporte a base de turba esterilizada, la cual se aplicó a dosis de 500 g ha⁻¹. El diseño fue bloques completos al azar con cinco repeticiones, la parcela experimental consistió de cuatro surcos de 0.81 m y de 6 m de longitud. Se aplicó un riego 10 días antes de la siembra, de una lámina de agua de 10 cm y dos riegos de auxilio a los 40 y 65 días después de la siembra; otras prácticas agronómicas se siguieron según las indicaciones locales para sorgo (INIFAP-CERIB, 2012).

Variables Evaluadas

En el estado fenológico de hoja bandera se midió el contenido de clorofila *in situ* mediante lecturas

Cuadro 1. Propiedades del suelo determinadas previo al establecimiento de los experimentos.

Localidad	pH	C.E.	M.O.	NO ₃ -N	P	K	Textura
		dS m ⁻¹	%	- - - - - mg kg ⁻¹ - - - - -			
El Vaso	8.5	0.83	2.38	15.5	10.1	888	Franco
CERIB	8.0	1.2	1.75	12.4	28.0	862	Franco limosos

C.E. = conductividad eléctrica; M.O. = materia orgánica; NO₃-N = nitrato de nitrógeno; P = fósforo; K = Potasio.

tomadas en la parte central de 25 hojas bandera, con un determinador portátil Minolta SPAD-502®. En floración se hizo análisis foliar del contenido de N, P, Fe y Zn, en el Laboratorio de Suelo-Planta y Agua del Campo Experimental Río Bravo, INIFAP. El N se cuantificó en porcentaje mediante el método Kjeldahl con digestión rápida, el P en porcentaje con el método amarillo del ácido colorimétrico de vanadomolibdofosfórico y el Fe y Zn en mg L⁻¹ mediante una digestión húmeda con mezcla de ácido nítrico-perclórico, las concentraciones de los elementos se determinaron con espectrofotómetro de absorción atómica (Plenecassagne *et al.*, 1999). Además, se tomaron al azar cinco plantas de cada parcela para estimar la biomasa seca foliar y radical (g), mediante el secado en estufa a 60 °C durante tres días.

En madurez fisiológica se obtuvieron cinco plantas, las cuales se sacaron con pala para extraer el volumen de suelo bajo la planta (≈30 cm), en ellas se determinó el porcentaje de colonización total. Las raíces se lavaron para eliminar el suelo, se cortaron en fragmentos de 1 cm, se mezclaron y se tomaron submuestras de 1 g. Para determinar la colonización, se siguió la técnica de clareo con 10% KOH, y de tinción de azul tripano al 0.03% (Phillips y Hayman, 1970), con montaje en laminillas para examinar microscópicamente los segmentos y determinar el porcentaje de estructuras fúngicas, según el método de Giovannetti y Mosse (1980). El rendimiento de grano se cuantificó al cosechar y trillar las panojas de los dos surcos centrales, con humedad de grano ajustada al 14%.

Análisis Estadístico

Los efectos de los tratamientos sobre las variables se determinaron por análisis de varianza combinado (riego-temporal), y la significancia entre los tratamientos e interacciones fue mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Además, se hicieron algunas correlaciones mediante el coeficiente de Pearson ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estatus Nutricional

El índice de clorofila SPAD y el contenido foliar de N, P y Fe, fueron afectados por las cepas microbianas evaluadas y la condición de humedad (riego y temporal, precipitación total de 102 y 177 mm,

respectivamente). Aunque solamente se obtuvieron interacciones significativas, cepa × condición, para N ($P = 0.01$), P ($P = 0.002$) y Zn ($P = 0.007$). Por el contrario, interacciones no significativas fueron para clorofila ($P = 0.65$) y Fe ($P = 0.36$), lo que indica que los dos factores son independientes. Los mayores registros de clorofila ($P = 0.01$) se observaron en las parcelas donde se aplicó la fertilización química y el HMA INIFAP (M) (Cuadro 2); este hecho tiene relevancia debido a que la variable correlacionó con N ($r = 0.94$), P ($r = 0.84$), biomasa foliar ($r = 0.89$) y rendimiento de grano ($r = 0.93$), por lo que expresa el estado nutricional de la planta. Se ha observado que la inoculación de sorgo con *Rhizophagus intraradices* incrementó los pigmentos fotosintéticos comparado con plantas no inoculadas (Díaz *et al.*, 2013a). Lu y Wu (2017) demostraron mayor crecimiento de planta y niveles de clorofilas (a y b) en trébol blanco (*Trifolium repens*) inoculado con *Diversispora versiformis* y *Paraglomus occultum*.

El contenido de Fe en hoja resultó sobresaliente al utilizar la cepa 32, en ambas condiciones de humedad, que superó ($P = 0.001$) los valores obtenidos del resto de los tratamientos (Cuadro 2). Es importante considerar que la deficiencia de Fe es común en los cultivos y representa un grave problema, particularmente en suelos calcáreos y alcalinos; la cepa 32 podría tener un uso potencial en suelos con limitada disponibilidad de este elemento. Astiko *et al.* (2013) y Díaz *et al.* (2013b) registraron diferente efectividad simbiótica de HMA en la absorción de Fe en soya y maíz.

Los valores de clorofila y Fe foliar fueron 22% ($P = 0.02$) y 238% ($P = 0.007$) superiores en el agrosistema con riego, respectivamente, comparado con la localidad con régimen de temporal (Cuadro 2). En general, las mayores concentraciones de N, P y Fe en el follaje del sorgo se registraron en la condición de riego (Cuadro 2). Seguramente, el factor condición de humedad en el suelo fue determinante para la mejor disponibilidad de los nutrientes en el sistema con riego ya que en la localidad de temporal se registraron 177 mm de precipitación durante el desarrollo del cultivo (febrero-junio).

La mayor absorción de N se obtuvo con el tratamiento fertilizado en la condición de riego (3.19%), seguido por las cepas M (3.06%), 3 (3.03%) y 32 (2.99%); en temporal destacaron los tratamientos fertilizado (2.63%) y la cepa M (2.58%) (Cuadro 3). Diferentes reportes indicaron que los HMA son

Cuadro 2. Índice de clorofila SPAD y contenido nutrimental foliar de sorgo (D-47), inoculado con cepas microbianas en dos localidades.

Factor	Clorofila	Contenido foliar			
		N	P	Fe	Zn
Cepa	SPAD	----- % -----		----- mg L ⁻¹ -----	
3 (<i>F. mosseae</i>)	45.2 ab*	2.28 bc	0.266 a	584 e	39.8 bc
20 (<i>Gigaspora albida</i>)	45.8 ab	2.27 bc	0.263 a	660 d	37.3 bc
32 (<i>F. mosseae</i>)	45.5 ab	2.28 bc	0.249 ab	1016 a	46.3 ab
35 (<i>F. mosseae</i>)	45.3 ab	2.38 bc	0.247 ab	919 bc	55.4 a
39 (<i>F. mosseae</i>)	44.1 b	2.19 cd	0.223 ab	836 c	47.5 ab
55 (<i>Gigaspora albida</i>)	44.7 b	2.33 bc	0.235 ab	950 b	50.1 a
M (<i>R. intraradices</i>)	47.8 a	2.72 ab	0.268 a	740 cd	45.3 ab
Ba (<i>Pseudomonas</i> spp.)	46.3 ab	2.54 b	0.244 ab	630 d	53.3 a
Testigo fertilizado [†]	48.6 a	2.91 a	0.249 ab	760 cd	41.1 bc
Testigo absoluto	42.9 c	1.95 d	0.204 c	495 f	35.0 c
Significancia F	0.01	0.01	0.001	0.001	0.04
Condición					
Riego (CERIB)	51.2	2.88	0.278	1145	45.4
Temporal (El Vaso)	39.9	1.93	0.211	481	44.9
Significancia F	0.01	0.003	0.001	0.001	0.52
Cepa × Condición	0.65	0.01	0.002	0.36	0.007

[†] Dosis de fertilización en riego 120-40-00 y temporal 60-40-00. * Valores con la misma letra no difieren según Tukey ($P < 0.05$).

capaces de incrementar la adquisición de N a la planta mediante las hifas externas (Hodge y Storer, 2015; Thirkell *et al.*, 2016). En particular Thirkell *et al.* (2016) demostraron el mecanismo por el cual los HMA promueven la absorción del N por las plantas, así como los beneficios en la nutrición y su crecimiento. Por el contrario, cepas de HMA evaluadas por Tchabi *et al.* (2010) en el tubérculo conocido como ñame blanco (*Dioscorea rotundata*) no mostraron incrementos en la absorción de N.

El mayor contenido de P fue obtenido en la condición de riego con la cepa 35 (0.303%); en temporal destacaron las cepas M (0.247%) y 3 (0.240%) (Cuadro 3). Los HMA tienen la particularidad, en su mecanismo simbiótico, de favorecer la absorción de P a las plantas (Deepika y Kothamasi, 2015). Tchabi *et al.* (2010), también detectaron variaciones en las concentraciones de P en planta con la inoculación de diferentes cepas de HMA.

Para el caso del Zn, en riego el mayor contenido fue con el consorcio Bacteriano 2709, Ba (58.6 mg L⁻¹),

mientras que en temporal la mejor fue la cepa 39 (56.6 mg L⁻¹) (Cuadro 3). Aguado y Moreno (2012) indicaron que a diferencia de *Azospirillum*, los efectos de *Pseudomonas* en los cultivos se encuentran menos documentados. En maíz de riego y con la evaluación de distintas cepas microbianas, Díaz *et al.* (2013b) reportaron resultados semejantes al señalar que el mismo consorcio Bacteriano 2709, incrementó la absorción de Zn. Govindasamy *et al.* (2017) y Ramond *et al.* (2013) demostraron amplia variabilidad de respuesta en las características de planta y nutrición mineral de sorgo a través de cepas de BPCV. Estudios de Esitken *et al.* (2010) concluyeron que cuando la fresa (*Fragaria × ananassa*) fue inoculada con cepas de BPCV *Pseudomonas* BA-8 y *Bacillus* M3 y 142, se incrementó el contenido foliar de P, Fe, Cu y Zn, el crecimiento y el rendimiento de fruto. Díaz *et al.* (2013a) reportaron que la inoculación de maíz (*Zea mays* L.) y pimiento (*Capsicum annuum*) con *R. intraradices* incrementó la adquisición de N, P, Fe, y Zn.

Cuadro 3. Concentración foliar de N, P y Zn en sorgo (D-47), influenciada por la inoculación de cepas microbianas y la condición de riego (R) y temporal (T).

Cepa	Condición	N	P	Zn
		- - - - - % - - - - -		mg L ⁻¹
3 (<i>F. mosseae</i>)	R	3.03 ab*	0.290 b	43.3 e
	T	1.53 h	0.240 de	36.3 f
20 (<i>Gigaspora albida</i>)	R	2.80 c	0.250 e	53.0 b
	T	1.54 h	0.252 e	42.0 e
32 (<i>F. mosseae</i>)	R	2.99 ab	0.263 d	48.3 c
	T	2.00 f	0.215 g	52.0 b
35 (<i>F. mosseae</i>)	R	2.93 bc	0.303 a	36.3 f
	T	1.75 g	0.204 ij	38.3 ef
39 (<i>F. mosseae</i>)	R	2.41 e	0.290 b	54.3 b
	T	2.48 e	0.191 k	56.6 ab
55 (<i>Gigaspora albida</i>)	R	1.80 fg	0.283 c	50.3 bc
	T	1.9 fg	0.207 i	42.3 e
M (<i>R. intraradices</i>)	R	3.06 ab	0.291 b	39.3 ef
	T	2.58 d	0.247 d	51.4 bc
Ba (<i>Pseudomonas</i> spp.)	R	2.92 bc	0.285 bc	58.6 a
	T	2.17 f	0.203 ij	48.0 c
Testigo fertilizado	R	3.19 a	0.287 b	50.6 bc
	T	2.63 d	0.211 gh	46.6 d
Testigo absoluto	R	2.40 e	0.233 f	30.0 g
	T	1.50 h	0.169 l	36.2 f

*Valores con la misma letra no difieren según Tukey ($P < 0.05$). R = riego; T = temporal.

Producción de Biomasa

Las cepas microbianas no afectaron la producción de biomasa seca de follaje ($P = 0.07$) y radical ($P = 0.09$) del sorgo (Cuadro 4). Por el contrario, otros estudios han demostrado el beneficio que aportan los inoculantes microbianos en la promoción de la biomasa vegetal (Lu y Wu, 2017; Govindasamy *et al.*, 2017). Debido a que la promoción de biomasa está asociada con la producción de fitohormonas, la diferencia de resultados podría atribuirse a las variaciones en la producción de fitohormonas entre las cepas microbianas y la especificidad simbiótica cepa-genotipo.

La condición de humedad solamente afectó el peso de la biomasa seca foliar ($P = 0.002$), en riego se registró un incremento de 38 g comparado con temporal. Además, no se observaron interacciones significativas cepa \times condición para biomasa foliar ($P = 0.56$) y radical ($P = 0.08$) (Cuadro 4).

Colonización Micorrízica

Se observaron diferencias estadísticamente significativas ($P = 0.01$) en la colonización micorrízica entre las cepas, que fluctuó de 28.4 a 92.6%, no así en las condiciones de humedad ($P = 0.45$), cuyo promedio fue de 67.1% ($P = 0.27$). En general, todas las plantas inoculadas con las cepas de HMA registraron altos porcentajes de colonización, con respecto al testigo fertilizado, absoluto y al Bacteriano 2629 (cepa Ba). Particularmente las que presentaron la mayor colonización fueron M, 55, 39 y 35, las cuales mostraron semejanzas y promediaron 88.9% (Cuadro 4). No obstante, la colonización no correlacionó con el rendimiento o sus componentes. Tapia *et al.* (2010) determinaron que el nivel de colonización micorrízica no siempre está asociado con la efectividad de la cepa de HMA.

Cuadro 4. Biomosas foliar y radical, colonización micorrízica y rendimiento de grano de sorgo (D-47), inoculado con cepas microbianas en dos localidades.

Factor	Biomasa foliar seca	Biomasa radical seca	Colonización	Rendimiento
Cepa	- - - - - g - - - - -		%	kg ha ⁻¹
M (<i>R. intraradices</i>)	61.4	20.5	88.1 a*	5672 ab
Ba (<i>Pseudomonas</i> spp.)	47.8	20.0	43.6 c	5487 bc
55 (<i>Gigaspora albida</i>)	53.1	17.9	89.8 a	5317 bc
39 (<i>F. mossae</i>)	59.6	18.7	85.4 a	5608 ab
35 (<i>F. mossae</i>)	56.5	19.4	92.6 a	5463 bc
32 (<i>F. mossae</i>)	52.0	17.9	78.8 ab	5227 bc
20 (<i>Gigaspora albida</i>)	56.2	19.6	65.2 b	5304 bc
3 (<i>F. mossae</i>)	52.5	19.6	67.8 b	5705 ab
Testigo fertilizado†	56.1	19.3	28.4 d	6016 a
Testigo absoluto	47.2	16.8	31.6 d	5031 c
Significancia F	0.06	0.09	0.01	0.03
Condición				
Riego (CERIB)	77.3	17.9	66.0	6498
Temporal (El Vaso)	39.3	19.9	68.2	4467
Significancia F	0.002	0.10	0.45	0.003
Cepa × Condición	0.56	0.08	0.27	0.33

† Dosis de fertilización en riego 120-40-00 y temporal 60-40-00. * Valores con la misma letra no difieren según Tukey ($P < 0.05$).

La diferente capacidad de colonización entre cepas de HMA ha sido también corroborada en otros cultivos (Montero *et al.*, 2010; Tchabi *et al.*, 2010). En su estudio, Tchabi *et al.* (2010) observaron que las cepas evaluadas de HMA fueron capaces de colonizar, independientemente de su procedencia. Cabe destacar que la colonización fúngica con Bacteriano 2629 superó al testigo fertilizado (Cuadro 4). Este fenómeno de incremento en la colonización natural de HMA, a través de la inoculación de rizobacterias, aunque no está esclarecido, también fue reportado en la leguminosa *Piptadenia gonoacantha* con cepas de rizobacterias fijadoras de nitrógeno (Junior *et al.*, 2017).

La condición de humedad no influyó en el nivel de colonización micorrízica, la cual promedió 67.1% (Cuadro 4). Resultados opuestos los obtuvieron Deepika y Kothamasi (2015), quienes mencionan que los niveles de humedad en el suelo ejercen efectos directos en la colonización de HMA, la mayor colonización la obtuvieron con 15-20% de humedad en el suelo.

Rendimiento de Grano

El rendimiento de grano fue influenciado por las cepas microbianas ($P = 0.03$) y por la condición de humedad ($P = 0.003$); no hubo interacción entre ambos factores ($P = 0.33$). Las cepas 39, 3 y M, resultaron competitivas con el rendimiento obtenido en las parcelas del testigo fertilizado (Cuadro 4). Estos resultados tienen gran relevancia en especial por las consecuencias económicas y de impacto ambiental que conlleva la práctica de fertilización. Resultados de cinco años sucesivos con sorgo, maíz y frijol, en riego y temporal (Salinas, 2007; Díaz *et al.*, 2014b), indicaron que el HMA INIFAP fue competitiva en rendimiento respecto a la fertilización química, pero fue superior en la rentabilidad de la producción en temporal y superior o igual en la condición de riego. En maíz de temporal, Aguado y Moreno (2012) señalaron que la inoculación con la BPCV Ba (Bacteriano 2709) en combinación

con el 50% de la fertilización química (15-15-00), igualó el rendimiento al obtenido con la fertilización convencional (100%).

No obstante, la respuesta sobresaliente de las cepas 39, 3 y M en el rendimiento de sorgo, es importante continuar con la introducción de HMA en función a que las plantas requieren de cepas eficientes, particularmente en situaciones de ausencia o bajas poblaciones de HMA nativos, en suelos erosionados, degradados, contaminados y en suelos con especies micorrízica ineficientes (Grageda *et al.*, 2012; Astiko *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2017). Otro aspecto interesante es comprender mejor las interacciones entre los inoculantes microbianos, la fertilización mineral y la planta, con el propósito de reducir o sustituir las cantidades de fertilizantes aplicados, reducir los costos de producción, así como los efectos nocivos en la agroecología. Este tema ha sido ampliamente abordado en diferentes estudios (Sharma *et al.*, 2012; Berruti *et al.*, 2015).

Los resultados del presente estudio mostraron que la expresión del potencial de los inoculantes microbianos en la nutrición y rendimiento de sorgo, variaron en función a la cepa utilizada. La efectividad del HMA INIFAP también ha sido reportada en sorgo cuando fue sometida bajo diferentes ambientes (Díaz *et al.*, 2014a). Tchabi *et al.* (2010) indicaron que la funcionalidad de los HMA es más dependiente de su capacidad y habilidad intrínseca que de su origen geográfico. Desde el punto de vista práctico, se le ha dado importancia en seleccionar inoculantes microbianos eficientes, que aumenten la productividad de los cultivos y que procedan de agroecosistemas particulares, donde se les pretendan incorporar como un elemento biotecnológico. Al respecto, Xiang *et al.* (2012) y Berruti *et al.* (2015); mencionan que el uso de bioinoculantes a base de HMA y BPCV se ha acrecentado comercialmente durante los últimos años, aunque revisten de gran importancia aquellos que tienen efectividad en los cultivos y que sean económicamente viables.

CONCLUSIONES

Las cepas microbianas influyeron de forma diferente en las características de sorgo sembrado en riego y temporal. El contenido foliar de zinc (Zn), colonización micorrízica y biomasa radical, no fueron afectados por la condición de humedad. En las dos condiciones de humedad, los mayores índices de

clorofila se registraron con el tratamiento fertilizado y HMA INIFAP, mientras que para el hierro (Fe) foliar destacó la cepa 32. En la condición de riego se obtuvieron las mayores concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P), destacaron la fertilización química, HMA INIFAP y las cepas 3 y 32 en la absorción de N, y la cepa 35 con el mayor contenido de P en las plantas. En riego, el consorcio Bacteriano 2709 incrementó los valores de Zn, mientras que en temporal fue la cepa 39. En ambas condiciones de humedad, la mayor colonización la registró el HMA INIFAP y las cepas 55 y 35; asimismo, el HMA INIFAP y las cepas 39 y 3 fueron competitivas en rendimiento con la fertilización química.

AGRADECIMIENTOS

Al apoyo otorgado por SAGARPA, mediante el convenio: Impulso a nuevos productos de la bioeconomía, y de investigación, transferencia de tecnología de biocombustibles, biofertilizantes y abonos orgánicos, en el uso sustentable de recursos naturales para la producción primaria.

LITERATURA CITADA

- Aguado S., G. A. y B. Moreno G. 2012. Biofertilizantes bacterianos desarrollados por el INIFAP. pp. 151-170. *In: G. A. Aguado S.* (ed.). Introducción al uso y manejo de los biofertilizantes en la agricultura. INIFAP/SAGARPA. México. ISBN: 978-607-425-807-3.
- Asmelash, F., T. Bekele, and E. Birhane. 2016. The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in the restoration of degraded lands. *Front. Microbiol.* 71: 1-15. doi: 10.3389/fmicb.2016.01095.
- Astiko, W., I. R. Sastrahidayat, S. Djauhari, and A. Muhibuddin. 2013. Soil fertility status and soybean [*Glycine max* (L) Merr] performance following introduction of indigenous mycorrhiza combined with various nutrient sources into sandy soil. *Agrivita* 35: 232-236.
- Berruti, A., E. Lumini, R. Baletrini, and V. Bianociotto. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: Let's benefit from past successes. *Front. Microbiol.* 61(6): 1559. doi: 10.3389/fmicb.2015.01559.
- Compant, S., C. Clement, and A. Sessitsch. 2010. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospect for utilization. *Soil Biol. Biochem.* 42: 669-678. doi: 10.1016/j.soilbio.2009.11.024.
- Deepika, S. and D. Kothamasi. 2015. Soil moisture-a regulator of arbuscular mycorrhizal fungi community assembly and symbiotic phosphorus uptake. *Mycorrhiza* 25: 67-75. doi: 10.1007/s00572-014-0596-1.

- Díaz F., A., M. Alvarado C., F. Ortiz C. y O. Grageda C. 2013a. Nutrición de la planta y calidad de fruto de pimiento asociado con micorriza arbuscular en invernadero. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4: 315-321.
- Díaz F., A., F. E. Ortiz C., M. G. Lozano C., G. A. Aguado S., and O. A. Grageda C. 2013b. Growth, mineral absorption and yield of maize inoculated with microbe strains. *Afr. J. Agr. Res.* 28: 3764-3769. doi: 10.5897/ajar2012.6662.
- Díaz F., A., H. M. Cortinas E., J. Valadez G. y M. Á. Peña R. 2014a. Micorriza arbuscular como alternativa en la producción de sorgo en Tamaulipas, México. *Invest. Cienc.* 62: 56-69.
- Díaz F., A., J. R. Salinas G., F. Espinosa S., M. Á. Peña R., F. R. Garza R. y O. A. Grageda C. 2014b. Características de planta, suelo y productividad entre sorgo fertilizado e inoculado con micorriza arbuscular. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5: 379-390.
- Díaz F., A., M. Espinosa R. y F. E. Ortiz C. 2016. Promoción de biomasa y contenido de azúcares en sorgo dulce mediante abonos orgánicos y micorriza arbuscular. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 32: 353-360. doi: 10.29937/rica.2016.32.03.09.
- Esitken, A., H. E. Yildiz, S. Ercisli, M. F. Donmez, M. Turan, and A. Gunes. 2010. Effects of plant growth promoting bacteria (PGPB) on yield, growth and nutrient contents of organically grown strawberry. *Sci. Hortic.* 124: 62-66. doi: 10.1016/j.scienta.2009.12.012.
- Giovannetti, M. and B. Mosse. 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytol.* 84: 489-500. doi: 10.1111/J.1469-8137.1980.tb04556.x.
- Govindasamy, V., S. K. Raina, P. George, M. Kumar, J. Rane, P. S. Minhas, and K. P. R. Vittal. 2017. Functional and phylogenetic diversity of cultivable rhizobacterial endophytes of sorghum [*Sorghum bicolor* (L)]. *Antonie van Leeuwenhoek* 110: 925-943. doi: 10.1007/s10482-017-0864-0.
- Grageda C., O., A. Díaz F., J. J. Peña C. y J. A. Vera N. 2012. Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3: 1261-1274.
- Hodge, A. and K. Storer. 2015. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: Implications for individual plants through to ecosystems. *Plant Soil* 386: 1-19. doi: 10.1007/s11104-014-2162-1.
- Hungria, M., J. C. Rubens, E. M. Souza, and F. O. Pedrosa. 2010. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yield of maize and wheat in Brazil. *Plant Soil* 331: 413-425. doi: 10.1007/s11104-009-0262-0.
- INIFAP (Instituto de Formación y Asesoramiento Profesional-CERIB). 2012. Paquetes tecnológicos de producción de cultivos. Centro de Investigación Regional Noreste, Campo Experimental Río Bravo, INIFAP, SAGARPA. México, D. F.
- Junior, J. Q., E. D. Jesús, F. J. Lisboa, R. L. Berbara, and S. M. Faria. 2017. Nitrogen-fixing bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi in *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) Macbr. *Braz. J. Microbiol.* 48: 95-100. doi: 10.1016/j.bjm.2016.10.013.
- Kim, S. J., J. K. Eo, E. H. Lee, H. Park, and A. H. Eom. 2017. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and soil conditions on crop plant growth. *Microbiology* 45: 20-24. doi: 10.5941/myco.2017.45.1.20.
- Kollakkodan, N., K. N. Anith, and N. V. Radhakrishnan. 2017. Diversity of endophytic bacteria from *Piper* spp. with antagonistic property against *Phytophthora capsici* causing foot rot disease in black pepper (*Piper nigrum* L.). *J. Tropical Agr.* 55: 63-70.
- Kovadio, A. N. M. S., J. Nandjui, S. M. Krou, D. J. M. Sery, P. N. Nelson, and A. Zézé. 2017. A native arbuscular mycorrhizal fungus inoculant outcompetes an exotic commercial species under two contrasting yam field conditions. *Rhizosphere* 4: 112-118. doi: 10.1016/rhisph.2017.10.001.
- Lire, H., S. Jha, and S. M. Philpott. 2017. Intersection between biodiversity conservation, agroecology, and ecosystem services. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 41: 723-760. doi: 10.1080/21683565.2017.1330796.
- Lu, L. H. and Q. S. Wu. 2017. Micorrizas promote plant growth, root morphology and chlorophyll production in white clover. *Biotechnology* 16: 34-39. doi: 10.3923/biotech.2017.34.39.
- Montero L., C. Duarte, R. Cun, J. A. Cabrera y P. J. González. 2010. Efectividad de biofertilizantes micorrízicos en el rendimiento de pimiento (*Capsicum annum* L. var. Verano 1) cultivado en diferentes condiciones de humedad del sustrato. *Cult. Trop.* 31: 11-14.
- Phillips, J. M. and D. S. Hayman. 1970. Improved procedure for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55: 158-161. doi: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3.
- Plenecassagne, L. A., E. Romero Fierro y C. López Borrego. 1999. Manual de Laboratorio: Análisis de suelo, planta y Agua. INIFAP-ORSTOM. CENID_RASPA. Gómez Palacio, Durango, México.
- Salinas G., J. R. 2007. Fertilización química y biológica en maíz, sorgo y frijol en riego y temporal. pp. 23-24. *In: SAGARPA, INIFAP CE Río Bravo* (eds.). Publ. Especial No. 32. México.
- Sangeeta, P., A. Dukare, G. S., Bandeppa, B. S. Manjunatha, and K. Annapurna. 2017. Plant growth-promoting rhizobacteria for abiotic stress alleviation in crops. pp. 57-79. *In: T. K. Adhya, B. B. Mishra, K. Annapurna, D. K. Verma, and U. Kumar* (eds.). *Advances in soil microbiology: Recent trends and future prospects. Microorganisms for Sustainability.* Springer. Singapore. doi: 10.1007/978-981-10-7380-9_4.
- Sharma, S., R. Gupta, G. Dugar, and A. K. Srivastava. 2012. Impact of application of biofertilizers on soil structure and resident microbial community structure and function. pp. 65-79. *In: D. Maheshwari* (ed.). *Bacteria in agrobiology: Plant probiotics.* Springer. Berlin, Germany.
- Smith, E. S. and D. Read. 2008. *Mycorrhizal symbiosis.* Academic Press. London, UK.
- Tapia G., J. J., R. Ferrera C., L. Varela F., J. C. Rodríguez O., J. C. Soria C., M. Á. Tiscareño I., C. Loredó O., J. Alcalá J. y C. Villar M. 2010. Infectividad y efectividad de hongos micorrízicos arbusculares nativos de suelos salinos en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*). *Rev. Mex. Micol.* 31: 69-74.
- Tchabi, A., D. Coyne, F. Hountondji, L. Lawouin, A. Wiemken, and F. Oehl. 2010. Efficacy of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi for promoting white yam (*Dioscorea rotundata*) growth in west Africa. *Appl. Soil Ecol.* 45: 92-100. doi: 10.1016/j.apsoil.2009.03.001.

Thirkell, T. J., D. D. Cameron, and A. Hodge. 2016. Resolving the 'nitrogen paradox' of arbuscular mycorrhizas: fertilization with organic matter brings considerable benefits for plant nutrition and growth. *Plant Cell Environ.* 39: 1683-1690. doi: 10.1111/pce.12667.

Xiang, W., L. Zhao, X. Xu, Y. Qin, and G. Yu. 2012. Mutual information flow between beneficial microorganisms and the roots of host plants determined the bio-functions of biofertilizers. *Am. J. Plant Sci.* 3: 1115-1120. doi: 10.4236/ajps.2012.38134.