

Hongos micorrizícos arbusculares mejoran el establecimiento de plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) en condiciones de salinidad

Arbuscular mycorrhizal fungi improve jalapeño pepper plants (*Capsicum annuum* L.) establishment under salinity conditions

Andrés Adrián Urías-Salazar¹ , Benjamín Abraham Ayil-Gutiérrez² , José Alberto López-Santillán¹ , Benigno Estrada-Drauillet¹ , Miguel Ángel Cano-González¹ , Jesús Guillermo Hernández-Martínez¹  y Wilberth Alfredo Poot-Poot^{1*} 

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias. Centro Universitario Adolfo López Mateos. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Avenida Universidad. S/N. C.P. 87000. Cd. Victoria, Tamaulipas, México.

² CONAHCYT. Centro de Biotecnología Genómica. Instituto Politécnico Nacional. Boulevard del Maestro. S/N. Esquina Elías Piña. Col. Narciso Mendoza. C.P. 88710. Reynosa Tamaulipas, México.

RESUMEN

La salinidad reduce la producción de los cultivos hasta un 50 %. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del producto comercial Suppra® como inóculo micorrízico en la morfología y rendimiento de plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) en un suelo con alta concentración de salinidad. Las plantas fueron inoculadas con el producto Suppra® en dosis de 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 g / planta utilizando como control plantas sin inocular. En etapa de producción se evaluaron variables morfológicas y de rendimiento. Los datos se analizaron mediante un ANOVA de una vía y prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las variables morfológicas de altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas, clorofila, número de flores, peso fresco, peso seco y volumen de raíz fueron superiores al control en 18.3, 23.6, 59.2, 13.6, 70.6, 11.6, 14.2 y 120 % en la dosis de 3.0 g. Esta misma tendencia fue observada con las variables de rendimiento, frutos totales, peso total de fruto y peso promedio de frutos con valores de 70.5, 63.3 y 59.2 % respectivamente. La dosis de 3.0 g del producto Suppra® mejoró el crecimiento y rendimiento del cultivo de chile jalapeño en condiciones de salinidad.

Palabras clave: Estrés abiótico, Tolerancia, Simbiosis.

ABSTRACT

Salinity reduces crop production by up to 50 %. The objective of this study was to evaluate the effect of the commercial product Suppra® as a mycorrhizal inoculum on the morphology and yield of jalapeño pepper plants (*Capsicum annuum* L.) in soil with a high concentration of salinity. The plants were inoculated with the product Suppra® at doses of 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, and 4.0 g / plant, using non-inoculated plants as a control. During the production stage, morphological and yield variables were evaluated. The data were analyzed using one-way ANOVA and a Tukey test ($p \leq 0.05$). Morphological variables such as plant height, stem diameter, number of leaves, chlorophyll content, number of flowers, fresh weight, dry weight, and root volume were superior to the control by 18.3, 23.6, 59.2, 13.6, 70.6, 11.6, 14.2, and 120 % respectively at the 3.0 g dose. This same trend was observed with yield varia-

bles, including total fruits, total fruit weight, and average fruit weight, with increases of 70.5, 63.3, and 59.2 % respectively. The 3.0 g dose of the product Suppra® improved the growth and yield of jalapeño pepper crops under salinity conditions.

Keywords: Abiotic stress, Tolerance, Symbiosis.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que enfrenta la humanidad es la escasez de alimentos debido a un aumento en la población mundial, además, se estima que para el 2050 la población aumente en 10 mil millones de personas (FAO, 2017). Esta escasez, puede magnificarse como consecuencia del cambio climático al ocasionar cambios en la temperatura, escasa precipitación y aumentos en la salinidad de los suelos, que en conjunto originan una disminución en el rendimiento de los cultivos agrícolas (Orosco-Alcalá *et al.*, 2018). Por lo tanto, es necesario implementar estrategias que permitan mejorar el rendimiento de los cultivos hasta un 60 % para garantizar el suministro de alimentos a la población creciente (Springmann *et al.*, 2018).

La salinidad de los suelos es un estrés que afecta la producción y rendimiento de los cultivos. Esta puede definirse como el aumento de sales solubles que afectan las funciones para el crecimiento normal de las plantas y se consideran salinos cuando la conductividad eléctrica (CE) es de 4 dS m⁻¹ (40 mM de NaCl) (Tester y Davenport, 2003; Munns y Tester, 2008). Se estima que el aumento de los suelos salinos en los campos agrícolas reducirá la superficie cultivable hasta 50 % para el año 2050 como resultado del cambio climático, la aplicación excesiva de fertilizantes y el manejo inadecuado del suelo (Wang *et al.*, 2003; Shrivastava y Kumar, 2015; Muhammad *et al.*, 2023).

El chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) es una de las hortalizas ampliamente consumidas a nivel mundial y su consumo *per cápita* oscila entre los 17.2 kg al año (Sánchez-Toledano *et al.*, 2023). Sin embargo, *Capsicum annuum* L., es altamente susceptible al estrés por salinidad en donde se ha reportado una disminución de su rendimiento cuando se cultiva en suelos con una conductividad de 4 dSm⁻¹ (aproxima-

*Autor para correspondencia: Wilberth Alfredo Poot Poot
Correo-e: wpoot@docentes.uat.edu.mx

Recibido: 30 de Marzo de 2023

Aceptado: 12 de Agosto de 2024

Publicado: 04 de Septiembre de 2024

damente 40 mM). Por lo tanto, surge la necesidad de contar con estrategias que sean amigables con el ambiente y que ayuden a mitigar la salinidad y así asegurar la disponibilidad de esta hortaliza (Wallender y Tanji, 2011; Aktas *et al.*, 2006; Wahab *et al.*, 2023).

Los efectos tóxicos de la salinidad pueden afectar a los cultivos en diferentes etapas de desarrollo, estos cambios abarcan la reducción de clorofila, disminución de la capacidad fotosintética, alteración del potencial de membrana celular, producción de especies reactivas de oxígeno (EROS), entre otros (Hussain *et al.*, 2017). Todo esto debido a los tres tipos de estrés (osmótico, iónico y oxidativo) que en conjunto afectan negativamente el rendimiento de los cultivos (Ahmadi y Soury, 2018; Kamran *et al.*, 2020). Las estrategias utilizadas para reducir el impacto de la salinidad en los suelos agrícolas involucran la aplicación de materia orgánica para reducir la evapotranspiración, lavado de suelos para reducir la concentración de las sales disueltas, encalado para aumentar los niveles de calcio y mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo y el uso de plantas tolerantes a la salinidad (Qadir *et al.*, 2007; Stavi *et al.*, 2021; Urías-Salazar *et al.*, 2023). Sin embargo, todas estas estrategias implican un costo y no resuelven definitivamente el problema. Otra de las alternativas son el uso de microorganismos con capacidad de interactuar con las raíces de los cultivos (interacción planta-microbio), en particular simbioses fúngicas como hongos micorrízicos, los cuales pueden ayudar a mitigar los efectos del estrés por salinidad (Dastogeer *et al.*, 2020).

El uso de hongos micorrízicos arbusculares como inóculos puede mejorar la tolerancia de las plantas al estrés salino (Evelin *et al.*, 2019), debido a la simbiosis de las hifas con la zona radicular, las cuales se extienden en el suelo y mejoran la capacidad de la planta para explorar áreas del suelo donde las raíces no llegan; por lo que se mejora la extracción de agua y nutrientes (fósforo, nitrógeno, potasio, zinc y cobre), además de ayudar a mantener el equilibrio iónico y osmótico, así como la activación del sistema antioxidante para evitar daños oxidativos de las EROS, que reducen los efectos nocivos de las sales en el crecimiento de las plantas (Evelin *et al.*, 2009; Smith *et al.*, 2010; Sheng *et al.*, 2011; Khalloufi *et al.*, 2017). En este sentido, un estudio reportado por Ait-El-Mokhtar *et al.* (2019), menciona que la simbiosis de AMF fue beneficiosa en plantas de *Ocimum basilicum* L. en regímenes salinos, ya que reduce significativamente los efectos nocivos del estrés salino mejorando significativamente la tasa fotosintética, los rasgos de intercambio de gases, el contenido de clorofila y la eficiencia del uso del agua. Por su parte, Afrangan *et al.* (2023) destacó las funciones reguladoras de las cepas *Glomus versiforme* y *Micrococcus yunnanensis* en el mantenimiento de un estado redox y la homeostasis iónica lo que mejora el crecimiento vegetativo y la asimilación neta en el cultivo de *Brassica napus* L.

Los productos comerciales a base de inoculantes micorrízicos como el MYKE® PRO GR (contiene las cepas *Rhizophagus irregularis* y *Glomus intraradices*) han demostrado efectividad para reducir los efectos del estrés salino (Rosa *et al.*,

2020), sin embargo, una opción prometedora es el producto comercial Suppra® el cual contiene más de 20 cepas fúngicas de los géneros *Acaulospora*, *Entrophospora*, *Scutellospora*, *Glomus*, *Gigaspora* y *Paraglomus*, las cuales en conjunto pueden beneficiar el establecimiento del cultivo en condiciones de salinidad. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del producto comercial Suppra® como inóculo micorrízico en la morfología y rendimiento de plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) en un suelo con alta concentración de salinidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento y material vegetal

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Biotecnología Vegetal y en el invernadero (23° 42' 52" latitud norte y 99° 9' 15" longitud oeste a 367 msnm) de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT). Se utilizaron semillas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) variedad Jalapeño M. de la compañía Vita Hortaflor.

Germinación y producción de plántula

La germinación y producción de plántula se llevó a cabo en condiciones de laboratorio, donde, se utilizaron charolas germinadoras de poliestireno de 200 cavidades las cuales fueron llenadas con turba (Peat moss®) como sustrato y se sembró una semilla por cavidad a una profundidad de 0.5 cm. Las charolas se transfirieron a un anaquel con lámparas de luz led (55 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) a 25°C durante 15 d. Después de la germinación, las plántulas fueron regadas cada tercer día con 100 mL / planta de una solución nutritiva de Hoagland y Arnold (1950), compuesta por NH_4NO_3 , H_3PO_4 , KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y MgSO_4 . Una vez que las plántulas desarrollaron de 6 a 8 hojas verdaderas, se llevaron al invernadero (humedad relativa de 60 % y temperatura de 31 °C) para su adaptación durante tres días y posterior trasplante.

Trasplante e inoculación con hongos micorrízicos

Las plántulas aclimatadas en el invernadero se trasplantaron en bolsas negras de polietileno de 40 × 40 cm, las cuales se llenaron con un suelo franco arcilloso obtenido de parcelas con altos niveles de aplicación de fertilizantes y que durante su análisis presentó una textura franco arcilloso con un pH moderadamente alcalino (7.70), alta conductividad eléctrica (9.01 dS m^{-1}), materia orgánica (4.37 %), N disponible (0.26 %), P disponible (100.8 mg kg^{-1}), K intercambiable (1.42 meq / 100 g), Fe (3.52 mg kg^{-1}), Zn (5.43 mg kg^{-1}) y carbonatos totales (26.1 %). Asimismo, previo al trasplante y al análisis de suelo cabe mencionar que se realizó la desinfección del suelo, la cual, consistió en aplicar una solución de formol al 4 % de manera manual, donde, el suelo tratado fue cubierto por un plástico impermeable durante 24 h, posteriormente, el plástico fue retirado y el suelo se dejó ventilar hasta que desapareciera el olor a formol.

Manejo agronómico

Se realizaron riegos auxiliares de 500 o 1000 mL / planta de solución nutritiva de Hoagland y Arnold (1950), de acuerdo



con la turgencia de las plantas y las condiciones climáticas. Los riegos con la solución nutritiva fueron ajustados de acuerdo con la etapa fenológica de las plantas. El manejo fitosanitario se realizó de manera preventiva con los siguientes productos: impiremax (imidacloprid) para ataque de mosquita blanca (*Bemisia tabasi*), mientras que, para el control de enfermedades fúngicas fue utilizado promyl (benomilo), el cual, fue aplicado al suelo 15 d antes de la inoculación con micorrizas.

Tratamientos

Los tratamientos consistieron en la inoculación de seis dosis del producto micorrizico Suppra®, los cuales consistieron en: 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 g / planta respectivamente y como control se utilizaron plántulas sin inocular. Se realizaron tres inoculaciones con el producto, la primera al momento del trasplante a bolsa definitiva, la segunda a los 25 días después de siembra (dds) y la tercera a los 40 dds; dichas inoculaciones se realizaron de manera superficial en la base del tallo. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con 10 repeticiones por tratamiento, en donde una planta representó una unidad experimental.

Variables evaluadas

Las variables morfológicas y de rendimiento se midieron a los 90 después del trasplante, es decir, cuando las plantas alcanzaron la etapa de producción. Entre las variables morfológicas se encuentran: altura de planta (AP), la cual se midió con una cinta métrica, diámetro de tallo (DT), el cual se registró con un vernier digital (Steren®), mientras que la clorofila se determinó mediante el equipo SPAD-502Plus. El número de hojas (NH) y área foliar (AF) se determinaron con el programa ImageJ versión 1.46r. Asimismo, se determinó el volumen de raíz (VR) por desplazamiento de agua mediante una probeta graduada, el peso fresco (PF) y peso seco (PS) obtenido en una estufa de aire forzado (Riossa H-33) y los pesos fueron registrados mediante una balanza analítica (Pioneer TM de OHAUS), mientras que número de flores (NF) fue por conteo visual.

Como variables de rendimiento se midieron: frutos totales (FT), peso total de fruto (PTF) y peso promedio de fruto (PPF) registrándose con una balanza analítica (Pioneer TM de OHAUS) graduada en gramos (g), longitud de fruto (LF) y diámetro de fruto (DT) se midió con un vernier digital (Steren®).

metro de fruto (DT) se midió con un vernier digital (Steren®).

Análisis estadístico

Los datos de obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, mientras que las comparaciones de medias se realizaron con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) usando el software Minitab 19®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables morfológicas y clorofila

La adición del producto comercial de inóculos micorrizicos Suppra® en el suelo tuvo una influencia significativa ($p \leq 0.05$) en todas variables morfológicas evaluadas, así como en el contenido de clorofila (U-SPAD) en plantas de chile jalapeño (Tabla 1). La respuesta en cada una de las dosis estudiadas fue variable, siendo la dosis de 3.0 g la que presentó los mejores resultados con aumentos de 18.3, 23.6, 59.2, 13.6, 70.6, 11.6 y 14.2 % en las variables AP, DT, NH, CL, NF, PF y PS (excepto AF) con respecto al control, sin embargo, para las variables de AP, DT y NH se observó diferencia en todas las dosis aplicadas con respecto al control. Mientras que con la dosis de 4.0 g, se registraron disminuciones en NH, CL, NF, PF y PS de 41.3, 12.3, 56.9, 9.1 y 14.2 % a diferencia de AP y DT que fueron superiores en 3.7 y 1.4 % en comparación con la dosis de 3.0 g. Sin embargo, a dosis más bajas (0.5, 1.0 y 2.0 g) solamente el 50 % de las variables presentaron mejorías con respecto a la dosis control (Tabla 2).

La aplicación de hongos micorrizicos arbusculares en plantas ha demostrado efectos positivos en el crecimiento y desarrollo de plantas cultivadas bajo condiciones de estrés por salinidad. En este sentido, Ait-El-Mokhtar *et al.* (2019), reportaron que la inoculación de la palmera datilera (*Phoenix dactylifera* L.) con hongos micorrizicos arbusculares *Glomus* sp. (15 esporas / g suelo), *Sclerocystis* (9 esporas / g suelo) y *Acaulospora* sp. (1 espora / g suelo) mejoraron la altura de planta (AP), número de hojas (NH), área foliar (AF) y peso fresco de plantas (PF) en 15.38, 32.25, 78.99 y 222.01 % respectivamente con respecto a las plantas sin inocular. Por su parte, Liang *et al.* (2022) mencionan que con la aplicación de 120 g (1800 esporas) del hongo micorrizico arbusculares de la especie *Paraglomus occultum*, las plantas de tomate presentaron aumentos importantes en las variables morfológicas de altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT), peso

Tabla 1. Cuadrados medios y significancia estadística de variables morfológicas y clorofila en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) inoculadas con micorrizas.

Table 1. Mean squares and statistical significance of morphological variables and chlorophyll in jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) plants inoculated with mycorrhizae.

FV	AP	DT	NH	AF	CL	NF	PF	PS
Micorrizas	166.30 *	5.18 *	6578 *	448.73 *	54.18 *	161.94 *	3848.49*	52.35*
Error	51.69	0.22	1026	22.09	10.05	29.54	106.01	10.06
CV (%)	12.84	9.59	21.68	19.31	3.71	6.38	16.26	9.43

FV= fuente de variación; CV= coeficiente de variación; AP= altura de planta; DT= diámetro de tallo; NH= número de hojas; AF= área foliar; CL= clorofila; NF= número de flores; PF= peso fresco; PS= peso seco; *= significativo con $p \leq 0.05$.

Tabla 2. Comparación de medias de las variables morfológicas y clorofila en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) inoculadas con micorrizas.

Table 2. Comparison of means of morphological variables and chlorophyll in jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) plants inoculated with mycorrhizae.

Trat. (g)	AP (cm)	DT (mm)	NH	AF (cm ²)	CL (SPAD)	NF	PF (g)	PS (g)
Cont.	53.0 b	7.2 c	167.0 b	17.1 a	46.0 b	10.2 b	225.8 bc	47.6 d
0.5	61.8 a	8.7 a	237.3 a	14.5 b	47.0 b	12.5 b	243.4 ab	51.3 abc
1.0	62.2 a	8.0 b	282.0 a	12.2 c	46.7 b	12.3 b	182.9 d	44.3 d
2.0	61.7 a	8.0 b	277.0 a	14.6 b	48.1 b	12.1 b	217.4 c	55.2 a
3.0	62.7 a	8.9 a	266.0 a	16.8 a	52.3 a	17.4 a	252.1 a	54.4 ab
4.0	64.7 a	9.0 a	197.0 ab	14.5 b	46.6 b	11.6 b	159.4 e	48.8 bcd
CV %	11.98	0.78	3.73	0.54	5.28	6.69	16.26	9.43
Pro.	61.0	8.3	237.7	14.9	47.7	12.6	213.5	50.2

Trat= tratamiento; Cont= Control; CV= coeficiente de variación; Pro= promedio; AP= altura de planta; DT= diámetro de tallo; NH= número de hojas; AF= área foliar; CL= clorofila; NF= número de flores; PF= peso fresco; PS= peso seco. Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey; P ≤ 0.05).

fresco (PF) y en el contenido de clorofila (CL) en 40.51, 36.84 y 43.33, 70.88 % respectivamente con respecto a las plantas control. Mientras que Vosnjak *et al.* (2021) en su estudio con plantas de Ajania (*Ajania pacifica* (Nakai) Bremer et Humphries) la inoculación con el producto Symbivit (Symbiom Ltd., Sázava, República Checa) a base de hongos micorrizcos arbusculares resultó en una mejoría en el número de flores (NF) de 365 % con respecto a las plantas que no se inocularon. Asimismo, Chen *et al.* (2022) reportaron que el hongo micorrizco *Rhizophagus intraradices* al inocularse en plantas de frambuesa, estas mostraron cambios significativos en el número de flores (NF) de 33 % en comparación con las plantas que no se les aplicó la micorriza. En el presente estudio, las dosis evaluadas influenciaron positivamente a la mayoría de las variables morfológicas con respecto al control, sin embargo, el NF que tuvo un aumento del 70.6 % con la dosis de 3.0 g / planta, pudiera explicar el rendimiento obtenido en chile jalapeño (Tabla 2 y 4).

Por otra parte, se ha mencionado que los efectos positivos de los hongos micorrizcos pueden relacionarse también con el número de cepas presentes en el producto comercial en estudio. En este trabajo el producto comercial incluyó un consorcio de hongos micorrizcos arbusculares de los géneros *Acaulospora*, *Entrophospora*, *Scutellospora*, *Glomus*, *Gigaspora* y *Paraglomus* con la presencia de 20 especies (cepas), el cual pudiera tener una mayor efectividad para ayudar a mitigar los efectos negativos del estrés causado por la salinidad del suelo y en consecuencia mejorar el rendimiento del chile jalapeño (Tabla 3 y 4). De acuerdo con Sheng *et al.* (2011), la aplicación del del hongo micorrizco arbuscular (HMA) *Glomus mosseae* mejoró el desarrollo de biomasa vegetal y la acumulación de solutos orgánicos en hojas de maíz, asimismo, esta simbiosis elevó las concentraciones de azúcares solubles, azúcares reductores, proteína soluble, ácidos orgánicos totales, ácido oxálico, ácido fumárico, ácido acético, ácido málico y ácido cítrico, lo cual, podría ayudar a mitigar el estrés salino. Por su parte Hashem *et al.* (2018) mencionan que la aplicación de HMA mejoró el establecimiento

de pepino en condiciones salinas, esto al mitigar los efectos negativos de la salinidad por medio de la estimulación de las actividades de las enzimas antioxidantes (catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD) y ascorbato peroxidasa (APX) encargadas de la eliminación de radicales libres.

En cuanto al sistema radicular el producto comercial Suppra® aumentó el volumen de raíz en 20, 140 y 20 % en las dosis de 2.0, 3.0 y 4.0 g planta⁻¹ con respecto al control. Esta misma tendencia fue reportada por Kumar *et al.* (2010) quienes reportaron una mayor longitud y biomasa del sistema radicular de plantas de *Jatropha curcas* al inocularlas con hongos micorrizcos conformados por las especies de *Glomus mosseae*, *Glomus microcarpum*, *Glomus fasciculatum*, *Glomus intraradices*, *Gigaspora margarita* y *Gigaspora heterogama* en comparación con aquellas plantas que no fueron inoculadas cuando las plantas crecieron en estrés salino (CE de 7.2 dS m⁻¹). Asimismo, Chen *et al.* (2017) observaron que la inoculación de plantas de pepino (*Cucumis sativus* L. cv. Zhongnong No. 106) con dos preparaciones a base de inoculantes micorrizcos VT (*Claroideoglomus* sp., *Funnelformis* sp., *Diversispora* sp., *Glomus* sp. y *Rhizophagus* sp.) y BF (*G. intraradices*, *G. microageregatum* BEG y *G. Claroideum* BEG 210, y *Funnelformis mosseae* (Fm)), mejoraron el desarrollo de la zona radicular en 52.81 y 24.91 % respectivamente.

Este aumento de volumen del sistema radicular permitió que las plantas de chile jalapeño tuvieran mayor exploración en el estrato del suelo y por lo tanto una mejor absorción de agua y nutrientes lo que se reflejó en las variables morfológicas y de rendimiento (Tabla 2 y 4), debido a que la raíz es el órgano principal y de ella dependen estrictamente el resto de los órganos de la planta (Evelin *et al.*, 2019; Uga, 2021). En condiciones óptimas de desarrollo, las plantas utilizan la energía fotosintética para el mantenimiento general y una pequeña parte de esta energía es utilizada para la producción de biomasa (Smith *et al.*, 2023), sin embargo, en condiciones de estrés salino existe un mayor gasto energético para el mantenimiento y sobrevivencia de la planta, lo que se traduce en una disminución de la biomasa (Kumar *et al.*,

2022). En nuestro estudio, se pudo observar que la salinidad afectó negativamente el volumen de raíz en plantas control, no obstante, la simbiosis entre las micorrizas y la zona radicular favoreció el aumento del volumen de raíz en plantas de chile jalapeño (Figura 1 y 2 E).

Variables de rendimiento en chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.)

En cuanto a las variables de rendimiento, únicamente se detectaron diferencias significativas en frutos totales (FT),

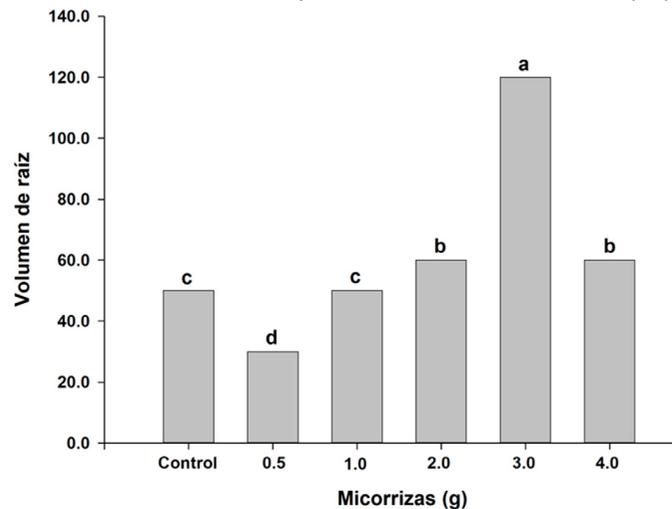


Figura 1. Volumen de raíz en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) a diferentes dosis de micorrizas Suppra®.

Figure 1. Root volume in jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) plants at different doses of Suppra® mycorrhizae.

peso total de frutos (PTF) y peso promedio de fruto PPF) en plantas de chile jalapeño tratadas con la micorriza (Tabla 3). Las plantas inoculadas con la dosis de 0.5 g de Suppra® mostraron incrementos de 22.5 y 35.6 % en las variables de frutos totales (FT) y peso promedio de frutos (PPF) respectivamente. Mientras que, con la dosis de 1.0 g solamente se observó 20.5 % de aumento en la variable de FT. A pesar de que en las dosis de 2.0, 3.0 y 4.0 g se detectaron cambios en las variables de FT, PTF y PPF, estos fueron más evidentes en la dosis de 3.0 g de Suppra® al obtenerse aumentos de 70.5, 63.3 y 59.2 % respectivamente con respecto al control (Tabla 4).

Los cambios en FT, PTF y PPF pueden atribuirse a una mayor absorción de nutrientes y agua debido a la simbiosis entre la raíz y la micorriza, que se reflejó en una mayor producción de frutos. Al respecto, Selvakumar y Thamizhiniyan (2011) mencionan que la inoculación con micorrizas mejoró el crecimiento y rendimiento de plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) en condiciones de estrés salino, atribuyendo esta adaptación a la reducción de Na⁺ en las hojas, así como a una mejor estabilidad de la membrana celular y mejor transporte de nutrientes (N, P, K). Por su parte, Biel *et al.* (2021) reportaron una mejoría del rendimiento en 21 % al aplicar el hongo micorrizíco arbuscular *Rhizoglyphus irregularis* en el cultivo del tomate. Mientras que Chen *et al.* (2022) evaluaron en su experimento el efecto de los tratamientos a base de fertilizantes, polinización, micorrizas y observaron que con la inoculación del hongo micorrizíco *Rhizophagus intraradices*, el rendimiento de fruto se mejoró en 43 % en plantas de frambuesa cv. Tulameen en comparación con las plantas control.



Figura 2. Efecto de las dosis de micorrizas Suppra® en la zona radical de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.). A) Control; B) 0.5 g; C) 1.0 g; D) 2.0 g; E) 3.0 g y F) 4.0 g (barra de escala: 5 cm).

Figure 2. Effect of Suppra® mycorrhizae doses on the root zone of jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.). A) Control; B) 0.5 g; C) 1.0 g; D) 2.0 g; E) 3.0 g and F) 4.0 g (scale bar: 5 cm).

Tabla 3. Cuadrados medios y significancia estadística de variables de rendimiento en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) inoculadas con micorrizas.

Table 3. Mean squares and statistical significance of yield variables in jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) plants inoculated with mycorrhizae.

FV	FT	PTF	PPF	LF	DF
Micorrizas	60.22 *	2324 ns	78.15 *	224.24 ns	27.18 ns
Error	16.15	1992	14.26	49.54	8.02
CV (%)	6.69	4.25	20.97	11.73	4.71

FV= fuente de variación; CV= coeficiente de variación; FT= frutos totales; PTF= peso total de frutos; PPF= peso promedio de frutos; LF= longitud de fruto; DF= diámetro de fruto; *= significativo con $p \leq 0.05$.

Tabla 4. Comparación de medias Tukey de variables rendimiento en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) inoculadas con micorrizas.

Table 4. Comparison of Tukey means of yield variables in jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) plants inoculated with mycorrhizae.

Tratamiento	FT	PTF	PPF	LF	DF
g	(g)	(g)	(g)	(mm)	(mm)
Control	10.2 b	71.5 c	21.6 b	40.2 a	16.7 a
0.5	12.5 ab	83.5 b	29.3 ab	33.6 ab	14.6 ab
1	12.3 ab	83.8 b	21.8 b	27.6 b	12.1 b
2	12.1 ab	85.4 b	24.1 ab	37.9 a	14.9 ab
3	17.4 a	116.8 a	34.2 a	38.0 a	15.7 ab
4	11.6 b	93.1 b	29.9 a	39.4 a	16.2 a
CV (%)	6.69	4.25	20.97	11.73	4.71
Promedio	12.68	89.01	26.81	36.11	15.03

CV= coeficiente de variación; FT= frutos totales; PTF= peso total de frutos; PPF= peso promedio de frutos; LF= longitud de fruto; DF= diámetro de fruto; Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey; $P \leq 0.05$).

El estrés salino es una de las principales causas que afecta el desarrollo y crecimiento de las plantas debido a los daños que ocasiona a nivel celular, bioquímico, fisiológico y molecular que en su conjunto afectan el rendimiento de los cultivos (Garg y Bharti, 2018). Sin embargo, en el presente estudio claramente se pudo observar que la aplicación de la micorriza tuvo un efecto positivo en el rendimiento de chile jalapeño bajo estrés salino. Esto puede deberse a los beneficios atribuidos a las micorrizas como son la exclusión del Na^+ al discriminar su absorción del suelo durante su transferencia a la planta (Hammer *et al.*, 2011), mantenimiento del equilibrio osmótico, estimulación de las enzimas antioxidantes, protección del sistema fotosintético (Khaloufi *et al.*, 2017), aumento de la absorción de fósforo, de macro y micronutrientes (Hart y Forsythe, 2012), lo que se traduce en un mejor desarrollo del sistema radicular, mayor capacidad de exploración del suelo, mejor transporte de nutrimentos (fotosintatos) que permiten un aumento en variables asociadas al rendimiento (Sadhana, 2014).

CONCLUSIONES

La inoculación con el producto comercial Suppra® a base de hongos micorrizcos mejoró el establecimiento de las plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) por medio de un mayor desarrollo en las variables morfológicas y de rendimiento, la cual fue más evidente en la dosis de 3.0 g / planta ya que mostró mayor aumento en el número y peso de frutos. Por lo

que esta dosis puede utilizarse como inóculo en este cultivo para mitigar el estrés por salinidad, debido a que las variables morfológicas y de rendimiento evaluadas fueron afectadas en menor grado bajo estas condiciones.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada (No. 784170) al primer autor. También, a la Facultad de Ingeniería y Ciencias (FIC) perteneciente a la Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT) por facilitar sus instalaciones para el desarrollo de la investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Ahmadi, M., y Soury, M.K. 2020. Growth characteristics and fruit quality of chili pepper under higher electrical conductivity of nutrient solution induced by various salts. *AGRIVITA, Journal of Agricultural Science*. 42(1):143-152. <https://doi:10.17503/agrivita.v42i1.2225>.
- Ait-El-Mokhtar, M., Laouane, R.B., Anli, M., Boutasknit, A., Wahbi, S., y Meddich, A. 2019. Use of mycorrhizal fungi in improving tolerance of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seedlings to salt stress. *Scientia Horticulturae*. 253: 429-438. <https://doi:10.1016/j.scienta.2019.04.066>.
- Aktas, H., Abak K., y Cakmak I. 2006. Genotypic variation in the response of pepper to salinity. *Scientia Horticulturae*. 110: 260-266. <https://doi:10.1016/j.scienta.2006.07.017>.
- Argentel, M.L., Fonseca R.I., Garatuza P.J., Yépez G.E., y González A.J. 2017. Efecto de la salinidad en callos de variedades de trigo durante el cultivo *in vitro*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8: 477-488. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.25>.
- Biel, C., Camprubí, A., Lovato, P.E., y Calvet, C. 2021. On-farm reduced irrigation and fertilizer doses, and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation improve water productivity in tomato production. *Scientia Horticulturae*. 288, 110337. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110337>.
- Castellón-Martínez, E., Chávez-Servia, J.L., Carrillo-Rodríguez, J.C., y Vera-Guzman, A.M. 2012. Pre-ferencias de consume de chiles (*Capsicum annuum* L.) nativos en los valles centrales de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 5:27-35.
- Chen, K., Kleijn, D., Scheper, J., y Fijen, T.P. 2022. Additive and synergistic effects of arbuscular mycorrhizal fungi, insect pollination and nutrient availability in a perennial fruit crop. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 325, 107742. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107742>.
- Chen, S., Zhao, H., Zou, C., Li, Y., Chen, Y., Wang, Z., Jian, Y., Liu, A., Zhao P., Wang M., y Ahammed, G.J. 2017. Combined inoculation with multiple arbuscular mycorrhizal fungi improves growth, nutrient uptake and photosynthesis in cucumber seedlings. *Frontiers in Microbiology*. 8, 2516. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02516>.
- Dastogeer, K.M., Zahan, M.I., Tahjib-Ul-Arif, M., Akter, M.A., y Okazaki, S. 2020. Plant salinity tolerance conferred by arbuscular mycorrhizal fungi and associated mechanisms: a meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*. 11, 588550. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.588550>.

- Evelin, H., Devi, T.S., Gupta, S., y Kapoor, R. 2019. Mitigation of salinity stress in plants by arbuscular mycorrhizal symbiosis: current understanding and new challenges. *Frontiers in Plant Science*. 10:470. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00470>.
- Evelin, H., Kapoor, R., y Giri, B. 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. *Annals of botany*. 104(7): 1263-1280. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp251>.
- Garg, N., y Bharti, A. 2018. Salicylic acid improves arbuscular mycorrhizal symbiosis, and chickpea growth and yield by modulating carbohydrate metabolism under salt stress. *Mycorrhiza*. 28(8): 727-746.
- Hammer, E., Nasr, H., Pallon, J., Olsson, P., y Wallander, H. 2011. Elemental composition of arbuscular mycorrhizal fungi at high salinity. *Mycorrhiza*. 21:117-129. <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0316-4>.
- Hart, M.M., y Forsythe, J.A. 2012. Using arbuscular mycorrhizal fungi to improve the nutrient quality of crops, nutritional benefits in addition to phosphorus. *Scientia Horticulturae*. 148:206-214. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.09.018>.
- Hashem, A., Alqarawi, A.A., Radhakrishnan, R., Al-Arjani, A.-B.F., Aldehaish, H.A., Egamberdieva, D., y Abdallah, E.F. 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi regulate the oxidative system, hormones and ionic equilibrium to trigger salt stress tolerance in *Cucumis sativus* L. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 25, 1102-1114. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.03.009>.
- Hoagland, D.R., y Arnon, D.I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *Circular & California Agricultural Experiment Station*. 347, 32.
- Hussain, S., Zhang, J.H., Zhong, C., Zhu, L.F., Cao, X.C., Yu, S.M., Bohr, J.A., Hu, L., y Jin, Q.Y. 2017. Effects of salt stress on rice growth, development characteristics, and the regulating ways: A review. *Journal of integrative agriculture*. 16(11): 2357-2374. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61608-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61608-8).
- Kamran, M., Parveen, A., Ahmar, S., Malik, Z., Hussain, S., Chattha, M.S., Saleem, M.H., Adil, M., Heidari, P., y Chen, J.T. 2020. An overview of hazardous impacts of soil salinity in crops, tolerance mechanisms, and amelioration through selenium supplementation. *International Journal of Molecular Sciences*. 21(1):148. <https://doi.org/10.3390/ijms21010148>.
- Khalloufi, M., Martínez-Andújar, C., Lachaâl, M., Karray-Bouraoui, N., Pérez-Alfocea, F., y Albacete, A. 2017. The interaction between foliar GA₃ application and arbuscular mycorrhizal fungi inoculation improves growth in salinized tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants by modifying the hormonal balance. *Journal of Plant Physiology*. 214: 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.04.012>.
- Kumar, A., Sharma, S., y Mishra, S. 2010. Influence of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and salinity on seedling growth, solute accumulation, and mycorrhizal dependency of *Jatropha curcas* L. *Journal of Plant Growth Regulation*. 29: 297-306. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9136-1>.
- Kumar, A., Yadav, A., Dhanda, P.S., Delta, A.K., Sharma, M., y Kaushik, P. 2022. Salinity stress and the influence of bioinoculants on the morphological and biochemical characteristics of faba bean (*Vicia faba* L.). *Sustainability*. 14(21): 14656. <https://doi.org/10.3390/su142114656>.
- Liang, S.M., Li, Q.S., Liu, M.Y., Hashem, A., Al-Arjani, A.B.F., Alenazi, M.M., Abd, W.F., Muthu-ramalingam, P., y Wu, Q.S. 2022. Mycorrhizal effects on growth and expressions of stress-responsive genes (aquaporins and SOSs) of tomato under salt stress. *Journal of Fungi*. 8(12): 1305. <https://doi.org/10.3390/jof8121305>.
- Muhammad, M., Waheed, A., Wahab, A., Majeed, M., Nazim, M., Liu, Y.H., y Li, W.J. 2023. Soil salinity and drought tolerance: An evaluation of plant growth, productivity, microbial diversity, and amelioration strategies. *Plant Stress*. 100319. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100319>.
- Munns, R., y Tester, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*. 59:651-81. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>.
- Navarro, J.M., Flores, P., Garrido C., y Martínez V. 2006. Changes in the contents of antioxidant compounds in pepper fruits at different ripening stages, as affected by salinity. *Food Chemistry* 96: 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.057>.
- Qadir, M., Oster, J.D., Schubert, S., Noble, A.D., y Sahrawat, K.L. 2007. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in Agronomy*. 96, 197-247. doi:10.1016/s0065-2113(07)96006-x.
- Rosa, D., Pogiatis, A., Bowen, P., Kokkoris, V., Richards, A., Holland, T., y Hart, M. 2020. Performance and establishment of a commercial mycorrhizal inoculant in viticulture. *Agriculture*. 10(11), 539. doi.org/10.3390/agriculture10110539.
- Sadhana, B. 2014. Arbuscular mycorrhizal Fungi (AMF) as a Biofertilizer-a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 3(4): 384-400.
- Sánchez-Toledano, B.I., Camarena-Gómez, D.M.J., López-Santiago, M.A., y Cuevas-Reyes, V. 2023. Consumer preferences of jalapeño pepper in the Mexican market. *Horticulturae*. 9(6), 684. doi.org/10.3390/horticulturae9060684.
- Selvakumar, G., y Thamizhiniyan, P. 2011. The effect of the arbuscular mycorrhizal (AM) fungus *Glo-mus* intraradices on the growth and yield of chilli (*Capsicum annum* L.) under salinity stress. *World Applied Sciences Journal*. 14(8): 1209-1214.
- Sheng, M., Tang, M., Zhang, F., y Huang, Y. 2011. Influence of arbuscular mycorrhiza on organic solutes in maize leaves under salt stress. *Mycorrhiza*. 21: 423-430. doi: 10.1007/s00572-010-0353-z.
- Shrivastava, P., y Kumar R. 2015. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 22: 123-131.
- Smith, S.E., Facelli, E., Pope, S., y Smith, F.A. 2010. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Plant Soil*. 326, 3-20. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9981-5>.
- Smith, E.N., van Aalst, M., Tosens, T., Niinemets, Ü., Stich, B., Morosinotto, T., Morosinotto T., Alboresi, A., Erb, T.J., Go, P.A., Gómez-Coronado, Tolleter, D., Finazzi, G., Curien, G., Heinemann, M., Ebenhoh, O., Hibberd, J.M., Schlüter, U., Sun, T., y Weber A.P.M. 2023. Improving photosynthetic efficiency toward food security: Strategies, advances, and perspectives. *Molecular Plant*. 16, 1547-1563. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.08.017>.
- Stavi, I., Thevs, N., y Priori, S. 2021. Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures. *Frontiers in Environmental Science*. 330. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831>.



- Tester, M., y Davenport R. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annals of Botany* 91: 503-527.
- Uga, Y. 2021. Challenges to design-oriented breeding of root system architecture adapted to climate change. *Breeding science*. 71(1): 3-12. [https://doi: 10.1270/jsbbs.20118](https://doi.org/10.1270/jsbbs.20118).
- Urías-Salazar, A.A., Ayil-Gutiérrez, B.A., Segura-Martínez, M., T. de J., Silva-Espinosa, J.H.T., Delgado-Martínez, R., y Poot-Poot, W.A. 2023. Lethal dose 50 of NaCl and ethylmethanesulfonate in jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings and tolerance to salinity. *Ciência e Agrotecnologia*. 47, e015722. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202347015722>.
- Vosnjak, M., Likar, M., y Osterc, G. 2021. The effect of mycorrhizal inoculum and phosphorus treatment on growth and flowering of *Ajania* (*Ajania pacifica* (Nakai) Bremer et Humphries) plant. *Horticulturae*. 7(7), 178. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7070178>.
- Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C., y Reddy, S.P.P. 2023. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants*. 12(17), 3102.
- Wallender W.W., y Tanji K.K. 2011. Agricultural salinity assessment and management. American Society of Civil Engineers; Reston, VA, USA. <https://doi.org/10.1061/9780784411698>.
- Wang, W., Vinocur B., y Altman A. 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*. 218:1-14. [https://doi: 10.1007/s00425-003-1105-5](https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5).