



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**EFFECTIVIDAD DE CEPAS NATIVAS
DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES
EN CHILE MIRASOL (*Capsicum annum* L.)
EN INVERNADERO**

BETY FABIOLA LÓPEZ GÓMEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2013

La presente tesis titulada: **Efectividad de cepas nativas de hongos micorrízicos arbusculares en chile Mirasol (*Capsicum annuum* L.) en invernadero**, realizada por la alumna **Bety Fabiola López Gómez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. Roberto Quintero Lizaola

ASESOR

Dr. Alfredo Lara Herrera

ASESOR

Dr. Alejandro Alarcón

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Diciembre de 2013

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Colegio de Postgraduados que con su apoyo me dieron la oportunidad de continuar con mi formación académica.

A la Unidad Académica de Agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas por proporcionarme las facilidades para llevar a cabo una parte de mi trabajo de investigación.

Al Dr. Roberto Quintero Lizaola por el tiempo y atención brindados durante mi permanencia en la institución.

Al Dr. Alfredo Lara Herrera por ese apoyo incondicional que siempre me ha brindado y que sin el cual no habría sido posible llevar a cabo este trabajo.

Al Dr. Alejandro Alarcón por su invaluable apoyo en la realización de mi trabajo de investigación.

A los compañeros con los que tuve la valiosa oportunidad de convivir y que me apoyaron en diferentes actividades de invernadero y laboratorio.

A los responsables del laboratorio de micorrizas y fijación de nitrógeno por permitirme utilizar sus instalaciones y materiales.

DEDICATORIA

A Dios:

Por permitirme vivir esta experiencia, por darme la fortaleza necesaria para poder seguir luchando por mis sueños, los cuales sin ti mi dios, sería imposible que yo lograra realizar.

A mis padres:

Ignacio López Ruíz

y

Ma. Silvina Gómez Quiroz

Quienes son el motor que me impulsa a no dejarme vencer ante las adversidades de la vida, por ser mis ejemplos a seguir.

A mis hermanos:

Aidel, Yobany, Manuel, Javier y Jerson por estar siempre al pendiente de mí y no dejarme sola en esta travesía.

A mi cuñis Yeny que también puso su granito de arena para que todo me saliera bien

CONTENIDO

Resumen	i
Abstract	ii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1. Planteamiento del problema.....	1
2. Objetivos.....	2
3. Hipótesis.....	3
4. Revisión de literatura.....	3
4.1 Antecedentes del cultivo de chile (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	3
4.2 El cultivo de chile en Zacatecas.....	5
4.3 Antecedentes de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA).....	6
4.4 Efectos benéficos de la asociación micorrízica arbuscular.....	11
4.4.1 Protección brindada por HMA contra el estrés hídrico.....	13
4.4.2 Beneficios de los HMA en la nutrición de las plantas.....	14
4.5 Antecedentes de los HMA en el cultivo de chile (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	14
5. Literatura citada.....	17
 CAPÍTULO I. SELECCIÓN DE CEPAS NATIVAS DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES AISLADAS DE DOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CHILE (<i>Capsicum annuum</i> L.) MIRASOL	
Resumen.....	22
Abstract.....	23

1.1 Introducción.....	24
1.2 Materiales y métodos.....	26
1.3 Resultados y discusión.....	34
1.4 Conclusiones.....	42
1.5 Literatura citada.....	42

CAPÍTULO II. CEPAS NATIVAS DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES Y FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CHILE (*Capsicum annuum* L.) MIRASOL EN INVERNADERO

Resumen.....	47
Abstract.....	48
2.1 Introducción.....	49
2.2 Materiales y métodos.....	51
2.3 Resultados y discusión.....	58
2.4 Conclusiones.....	63
2.5 Literatura citada.....	64

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES 68

1. Conclusiones.....	68
2. Recomendaciones.....	68

ANEXOS 69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Ubicación taxonómica y géneros de hongos formadores de micorriza arbuscular (Schüßler <i>et al.</i> , 2001; Walter <i>et al.</i> , 2004; Oehl y Sieverding, 2004; Walter y Schüßler, 2004).....	8
Cuadro 2.	Características físicas y químicas de los suelos utilizados como inoculo micorrízico y cantidad de esporas de HMA.....	29
Cuadro 3.	Definición de los 30 tratamientos evaluados en el experimento.....	30
Cuadro 4.	Características físicas y químicas del suelo utilizado como sustrato para el trasplante.....	52
Cuadro 5.	Características de los inoculantes que se utilizaron en el experimento	54
Cuadro 6.	Tratamientos para evaluar el efecto de cepas nativas de HMA provenientes de dos sistemas de producción uno tradicional (TRA) y otro tecnificado (TEC) en plantas de chile mirasol.....	56
Cuadro 7.	Efecto en el número de flores, frutos y en el rendimiento total de las plantas de chile mirasol por las fuentes de inóculo micorrízico TEC Y TRA combinadas con las dosis de fertilización química al 100, 75 y 50%.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Tipos de asociación micorrízica arbuscular. a) Tipo <i>Arum</i> , caracterizado por hifas que crecen de forma intercelular (cabeza de flecha). b) Tipo <i>Paris</i> , caracterizado por hifas con crecimiento intracelular (cabeza de flecha). Se aprecian vesículas (v); el apresorio (A); hifas (flechas) y arbusculos (dos cabezas de flechas). Fuente: Tomado de Barrera 2009.....	10
Figura 2.	Altura de plantas de chile mirasol en función del efecto de inóculo de HMA proveniente de los sistemas de producción tecnificado a), tradicional b) y un testigo sin inocular a los 10, 20, 30 y 40 DDT.....	35
Figura 3.	Peso seco de hoja, tallo, raíz y biomasa total de plantas de chile mirasol, en función del efecto de inóculo proveniente de los sistemas de producción tecnificado a), tradicional b) y un testigo sin inocular, evaluados a los 90 DDT para cada tratamiento.....	38
Figura 4.	Porcentaje de colonización total de raíces de plantas de chile mirasol por el efecto de inóculo de HMA proveniente de los sistemas de producción tecnificado a), tradicional b) y un testigo sin inocular, evaluadas a los 90 DDT para cada tratamiento.....	41
Figura 5.	Efecto en la altura de las plantas de chile mirasol por las fuentes de inóculo micorrízico TEC Y TRA combinadas con las dosis de fertilización química al 100, 75 y 50%.....	59
Figura 6.	Efecto en el peso seco de hoja, tallo, raíz y en el peso seco total de las plantas de chile mirasol por las fuentes de inóculo micorrízico TEC Y TRA combinadas con las dosis de fertilización química al 100, 75 y 50%.....	63

EFFECTIVIDAD DE CEPAS NATIVAS DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN CHILE MIRASOL (*Capsicum annuum* L.)

EN INVERNADERO

Bety Fabiola López Gómez, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2013

Se aislaron y seleccionaron cepas nativas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) de suelos con producción tecnificada (TEC) y tradicional (TRA) de Chile (*Capsicum annuum* L.) Mirasol. Posteriormente, las cepas seleccionadas se evaluaron en su capacidad de promover el crecimiento de plantas de Chile Mirasol, en combinación con fertilización química recomendada (180-90-150) aplicada al 100, 75 y 50%. El experimento se dividió en dos etapas: En la primera etapa se seleccionaron cepas nativas de HMA aisladas de dos sistemas de producción de Chile. Los HMA contenidos en las muestras de suelo TEC y TRA, fueron inoculados en plántulas de Chile, y se incluyó un tratamiento testigo sin inocular; en total se obtuvieron 14 tratamientos para TEC y 15 con TRA, cada uno con ocho repeticiones. Los tratamientos TEC-11 y TRA-14 mostraron resultados más consistentes en altura de planta, biomasa seca (hojas, tallo, raíz, y total) y colonización micorrízica. La etapa dos consistió en la evaluación de cepas nativas de HMA seleccionadas de la primera etapa, en combinación con fertilización química, en el crecimiento de plantas de Chile Mirasol en invernadero se establecieron seis tratamientos con 12 repeticiones cada uno. Los tratamientos TEC+75 y TRA+100 favorecieron la altura de planta, el número de flores, el número de frutos, el peso seco (hoja, tallo, raíz, y total), y el rendimiento total al final del ciclo del cultivo.

Palabras clave: *Capsicum*, micorrizas, suelo, colonización de la raíz, producción tecnificada y tradicional.

**EFFECTIVENESS OF NATIVE STRAINS OF ARBUSCULAR
MYCORRHIZAL FUNGI ON MIRASOL PEPPER (*Capsicum annuum* L.)
IN GREENHOUSE CONDITIONS**

Bety Fabiola López Gómez, M.Sc.

Colegio de Postgraduados, 2013

Native strains of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) were isolated and screened from soil samples collected at two locations in which pepper crop are cultivated with high input (TEC) or traditional (TRA) managements. Furthermore, the selected strains of AMF were assessed for growth promotion of pepper plants (cv. Mirasol) in combination with recommended chemical fertilization (180-90-150) by applying it at 100, 75 and 50%. The experiment was split in two experimental stages: 1) Screening of native strains of AMF isolated from the two systems of crop pepper production. The AMF from soil samples at both conditions (TEC and TRA) were inoculated in pepper seedlings, including control plants without AMF. There were 14 treatments for TEC and 15 treatments for TRA, with eight replicates each. Treatments TEC-11 and TRA-14 resulted in improved plants responses of height, dry biomass (leaves, stems, roots, and total), and mycorrhizal root colonization. Stage 2 evaluated the two selected native strains of AMF in combination of chemical fertilization on the growth of pepper plants at greenhouse conditions. Treatments TEC+75 and TRA+100 favored the plant height, number of flowers, number of fruits, dry biomass (leaves, stems, roots and total), and the plant yield at the end of crop cycle.

Keywords: *Capsicum*, mycorrhizae, soil, root colonization, high input system, traditional production.

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un escenario en el que la agricultura debe ofrecer más alimento con cada vez menos recursos y tierra adecuada para esta actividad (Patiño, 2010), es necesario implementar técnicas de producción agrícola enfocadas al uso eficiente de los recursos que tiende hacia una agricultura sostenible. En este sentido, la aplicación de abonos orgánicos, la inoculación de hongos endomicorrízicos y microorganismos fijadores de nitrógeno son alternativas que pueden emplearse en la producción agrícola (Velasco *et al.*, 2001). Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, se hace necesario desarrollar estudios para definir estrategias en la fertilización biológica (Montero *et al.*, 2010).

Una de las alternativas para incrementar la producción agrícola es la aplicación de biofertilizantes producidos a partir de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), los (HMA) colonizan las raíces de la mayoría de los cultivos agrícolas (Dell *et al.*, 2002), que al establecer la simbiosis con las raíces de las plantas desempeñan importantes funciones, pues contribuyen de forma más eficiente a la supervivencia y el crecimiento de los cultivos, además de reducir los efectos de estrés asociados con la nutrición y las relaciones con el agua (Montero *et al.*, 2010). La utilización de cepas nativas de microorganismos en la elaboración de biofertilizantes, presentan mayor posibilidades de efectividad en el campo, por estar adaptados a las condiciones del suelo de cada región (Armenta *et al.*, 2010).

El cultivo de chile para secado en Zacatecas, que incluye los tipos Mirasol o Guajillo, Ancho, Puya y Pasilla, tienen una gran relevancia en el estado, dada su generación de empleos en el sector y el valor de la producción anual. La región productora de este tipo de chile incluye principalmente a los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Aguascalientes y Durango; donde la problemática que presenta el cultivo es similar; se considera que el principal reto es evitar que el cultivo de chile para secar continúe siendo un cultivo con una gran movilidad, al cambiar las áreas de cultivo de una región a otra, debido a la contaminación de los suelos y la pérdida de productividad en los terrenos (Bravo *et al.*, 2006).

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Evaluar la efectividad de cepas nativas de hongos micorrízicos arbusculares aisladas de dos sistemas de producción de chile Mirasol (tecnificado y tradicional) de Chaparrosa Villa de Cos Zacatecas, en el crecimiento de plantas de esta misma hortaliza en invernadero.

2.1 PARTICULARES

Seleccionar en invernadero cepas nativas de HMA provenientes de suelo rizosférico extraído de dos sistemas de producción del cultivo de chile Mirasol (tecnificado y tradicional) ubicados en la comunidad de Chaparrosa Villa de Cos, Zacatecas.

Generar información del comportamiento en invernadero de los HMA provenientes de un sistema de producción tradicional y uno tecnificado en plantas de chile Mirasol fertilizadas químicamente al 100, 75 y 50%.

3. HIPÓTESIS

3.1 GENERAL

Las propiedades del suelo determinan la eficiencia de las cepas nativas de hongos micorrízicos arbusculares y el crecimiento de las plantas de chile Mirasol.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 ANTECEDENTES DEL CULTIVO DE CHILE (*Capsicum annuum* L.)

La familia Solanácea es reconocida mundialmente por su importancia en términos de vegetales cultivables y el amplio rango de utilidad agronómica de sus especies. La familia Solanaceae es considerada el tercer taxa botánico más importante a nivel agronómico, lo cual ha generado que mundialmente se invierta un gran esfuerzo en estudiar la biología, ecología y

diversidad de hábitats de muchas de sus especies (Carreño *et al.*, 2007). El chile es uno de los cultivos vegetales más importantes en el mundo y se cultiva en una amplia gama de sistemas de producción.

El chile es originario de México, ya que existen evidencias de que fue cultivado desde el año 7000 al 2555 AC en los estados de Puebla y Tamaulipas. En este País, junto con la calabaza, el maíz y el frijol, el chile fue la base de la alimentación de las culturas de Mesoamérica. El género *Capsicum* incluye un promedio de 25 especies y al menos cinco de estas son cultivadas en mayor o menor grado, pero en el ámbito mundial, casi la totalidad del chile que se consume está dado por la especie *Capsicum annuum* L. (Olvera *et al.*, 1998).

Existe gran diversidad de chiles cultivados y silvestres; su distribución comprende desde cerca del nivel del mar, hasta los 2500 msnm (Galindo y Cabañas, 2006). Dado que se adapta a una gran diversidad de áreas agroecológicas, se le puede encontrar en el mercado durante todo el año. El cultivo está adaptado a condiciones tropicales, donde la producción excede las 30 t ha⁻¹ durante el periodo de maduración del fruto. Los frutos son variables en tamaño; muchas veces son rojos cuando maduran, con muchas semillas y usualmente muy pungentes (Hermosillo-Cereceres *et al.*, 2008).

En México, el chile es el segundo cultivo hortícola más importante, después del tomate (Galindo y Cabañas, 2006). Desde 1993, la producción y comercio mundial de chiles ha presentado un incremento del 8% promedio anual en el volumen y del 11% en los ingresos. La producción mundial alcanzó un millón 702 t con un valor de dos millones 800 mil dólares norteamericanos. El aumento se debe a la demanda creciente de este producto en todas sus

presentaciones (fresco, seco y procesado), tanto para consumo directo como para usos industriales (Azofeifa y Moreira, 2008).

Las principales áreas productoras de Chile son la India, Tailandia, Indonesia, Japón, México, Kenia, Sudán, Uganda y Nigeria (Cardona *et al.*, 2008). Dentro de los principales países productores de Chile en el mundo; México ocupa el cuarto lugar en cuanto a la superficie cultivada y el sexto en lo que respecta a la producción (Galindo y Cabañas, 2006). En el 2007 la producción mundial de Chile (*Capsicum* spp.) fue poco más de 30 millones de toneladas. México aportó 6.8% del total y se usó 27.5% de la superficie destinada al cultivo de hortalizas, generando más de \$ 5000 millones de pesos, que representó 23% de la producción hortícola nacional (García-Rodríguez *et al.*, 2010).

El consumo *per capita* de los mexicanos con relación a esta hortaliza es de 0.56 kg, por lo que éste se ubica como uno de los alimentos principales de la población, es ampliamente consumido como: platillo principal, condimento, encurtido y ensaladas (Bravo *et al.*, 2006), también se le atribuyen las cualidades de aliviar gripes hasta curar enfermedades mentales y además se ha reconocido al Chile como elemento protector, bioenergético y metafísico (Cardona *et al.*, 2008).

4.2 EL CULTIVO DE CHILE EN ZACATECAS

El estado de Zacatecas destaca como el principal productor de Chile seco (*Capsicum annuum* L.) en México a partir de los años ochenta; en el periodo de 1991 a 1996, aportó un promedio de 29 mil t año⁻¹ de Chiles Mirasol/Guajillo y Ancho, principalmente, que representa

51.16% de la oferta nacional. Además, se cultivan otros tipos de chile, entre los cuales predominan los chiles Puya y Pasilla. El cultivo de chile para comercializar en seco representó 61% de la superficie cosechada en 1995, que junto con el chile en verde, papa, cebolla, jitomate y brócoli ocuparon 91% de este grupo de cultivos, lo cual representa así una de las actividades agrícolas esenciales del sector rural. Cabe señalar que, del valor total de la producción estatal que se sembró bajo el sistema de riego, esta hortaliza aportó 18.9% en 1995. En el aspecto laboral, ocupa de 80 a 90 jornales ha⁻¹ durante el proceso productivo, aunque algunos autores estiman que se requieren de 150 a 165 jornales ha⁻¹ cuando se cosecha en seco, lo cual generaría una contratación de más de tres millones de jornales por ciclo en Zacatecas (Reyes *et al.*, 2001).

4.3 ANTECEDENTES DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES (HMA)

La historia de la micorriza se remonta a unos 460 millones de años (González y Maldonado, 2009), específicamente al periodo Devónico, a partir del cual hongos y plantas han coevolucionado hasta lo que son hoy en día. Sin embargo, el vocablo Micorriza fue empleado por primera vez y con un interés puramente sistemático, por el ilustre botánico de origen alemán Albert Bernard Frank en el año 1885, para designar “la asociación que se producía entre las hifas de algunos hongos del suelo con los órganos subterráneos de la gran mayoría de las plantas superiores”. Desde el punto de vista etimológico, la palabra se formó a partir del término griego “mykos” (hongo) y del vocablo latino “rhiza” (raíz) (Fernández, 2003). Debido a que tal asociación es ancestral muchas plantas pueden establecer dicha simbiosis, se calcula que actualmente entre 85 y 90% de las especies de plantas terrestres pueden colonizarse con estos hongos (González y Maldonado, 2009).

La simbiosis de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) es vista como un mutualismo clásico, una interacción en la que ambas partes se benefician (Hodge *et al.*, 2010). En esta asociación, la planta provee al hongo de entre el 10 y 20% de su producción fotosintética total, mientras que el hongo incrementa la absorción de nutrimentos del suelo, sobre todo los de difícil disponibilidad como el fósforo (González-Monterrubio *et al.*, 2005). Las asociaciones simbióticas mutualistas entre estos hongos microscópicos del suelo y la mayoría de las plantas terrestres, son del tipo de simbiosis microbio-planta más ampliamente distribuido en la naturaleza.

Dichos hongos pertenecen a un *Phylum* nuevo, descrito de manera independiente en el 2001: el *Glomeromycota* (Cuadro 1), del cual se calcula existen alrededor de 200 especies (González y Maldonado, 2009). Esta simbiosis juega un papel clave en el establecimiento y desarrollo de la mayoría de las plantas terrestres, entre las que se incluyen las especies de interés agrícola (cereales, leguminosas, hortícolas, frutales, ornamentales) (Azcón-Aguilar, 2004) y sólo algunas especies, como canola, col, brócoli, mostaza y espinaca, entre otros, no se colonizan por hongos arbusculares (González y Maldonado, 2009).

La simbiosis micorrízica arbuscular es interesante desde el punto de vista morfológico, ecológico, taxonómico y fisiológico, y sus efectos en la biología de la planta se relacionan con la nutrición, promoción del crecimiento, fisiología y otros beneficios directos e indirectos. Todo esto conlleva al conocimiento de su potencial de uso, tanto en aspectos de investigación fundamental como de aplicación (producción de inoculo y mantenimiento de cepas), así como el conocimiento pleno de sus limitaciones (Alarcón, 2007)

Cuadro 1. Ubicación taxonómica y géneros de hongos formadores de micorriza arbuscular
(Schüßler y Walker, 2010)

Phylum	Clase	Órdenes (4)	Familias (11)	Géneros (17)		
<i>Glomeromycota</i>	<i>Glomeromycetes</i>	<i>Glomerales</i>	<i>Glomeraceae</i>	<i>Glomus</i>		
				<i>Funneliformis</i>		
				<i>Claroideoglomeraceae</i>		
				<i>Rhizophagus</i>		
						<i>Sclerocystis</i>
						<i>Claroideoglomus</i>
				<i>Diversisporales</i>	<i>Gigasporaceae</i>	<i>Gigaspora</i>
						<i>Scutellospora</i>
						<i>Racocetra</i>
						<i>Acaulosporaceae</i>
						<i>Acaulospora</i>
						<i>Entrophosporaceae</i>
						<i>Entrophospora</i>
						<i>Pacisporaceae</i>
						<i>Pacispora</i>
						<i>Diversisporaceae</i>
						<i>Diversispora</i>
				<i>Otospora</i>		
		<i>Paraglomerales</i>	<i>Paraglomeraceae</i>	<i>Paraglomus</i>		
		<i>Archaeosporales</i>	<i>Geosiphonaceae</i>	<i>Geosiphon</i>		
			<i>Ambisporaceae</i>	<i>Ambispora</i>		
			<i>Archaeosporaceae</i>	<i>Archaeospora</i>		

La micorriza arbuscular es resultante de complejas interacciones secuenciales entre las hifas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y las células hospedantes, permitiendo así un estado mutualista funcional, donde factores de la planta, estimulan el crecimiento hifal de los hongos arbusculares en la fase de precolonización y formación de la simbiosis. Se distinguen dos mecanismos por los cuales las raíces contribuyen en el crecimiento hifal.

El primer mecanismo es iniciado inmediatamente por la presencia de las raíces y es repuesta de una importante estimulación en el crecimiento hifal de esporas germinando y requiere de la presencia de las esporas hasta la progresiva pérdida de las reservas de ésta. El segundo mecanismo es la activación que ocurre antes del contacto del hongo con la raíz y el crecimiento fúngico cesa inmediatamente después de remover las raíces. El crecimiento hifal es grandemente estimulado por interacciones sinérgicas entre exudados y componentes volátiles, producidos por la raíces, y el CO₂ es un compuesto volátil crítico que puede servir como fuente de carbono para el hongo (González *et al.*, 1998). Los hongos aparecen para adquirir el suministro total de carbono de la planta, y a través de colonización de las raíces por los HMA, los hongos pueden conferir una amplia gama de beneficios a las plantas (Hodge *et al.*, 2010).

Después de toda la secuencia de fenómenos de reconocimiento, la simbiosis micorrízica arbuscular se establece morfológicamente, donde las estructuras características son las vesículas y los arbusculos, estructuras internas de la raíz micorrizada y por las cuales la micorriza se denomina arbuscular. Estos componentes fúngicos no modifican morfológicamente la raíz y es imposible observarlos a simple vista (González *et al.*, 1998). La morfología de la colonización HMA puede variar dando lugar a lo que se denomina micorriza tipo “*Arum*” o tipo “*París*”. En el tipo *Arum* las hifas se diseminan de forma inter-celular dentro de la corteza de la raíz. Se forman unas ramas cortas con las que penetra la pared de las células corticales y la rama

extensivamente le da la característica estructural al “arbúsculo”. En el tipo *Paris* es un crecimiento en el que las hifas se extiende intracelularmente enrollándose, las cuales se propagan célula a célula y de la cual los arbúsculos pueden desarrollarse (Figura 1) (Hodge *et al.*, 2010).

Las vesículas (mismas que no se forman en los géneros *Gigaspora* y *Scutelospora*) son estructuras de forma globosa, usualmente llenas de lípidos, que sirven como órganos de almacenamiento de energía y estructuras reproductivas, se localizan entre y dentro de las células (intra e intercelulares).

Los arbúsculos son estructuras intracelulares (siempre dentro de las células) formados a partir de una hifa inter o intracelular, que mediante ramificaciones dicotómicas sucesivas forma una extensa cantidad de ramas con diámetro menor de 1 μ . Son de corta vida (4 a 14 días promedio) y cuyo papel es contribuir al incremento de la capacidad de absorción y aprovechamiento de nutrimentos por ambos participantes de la simbiosis.

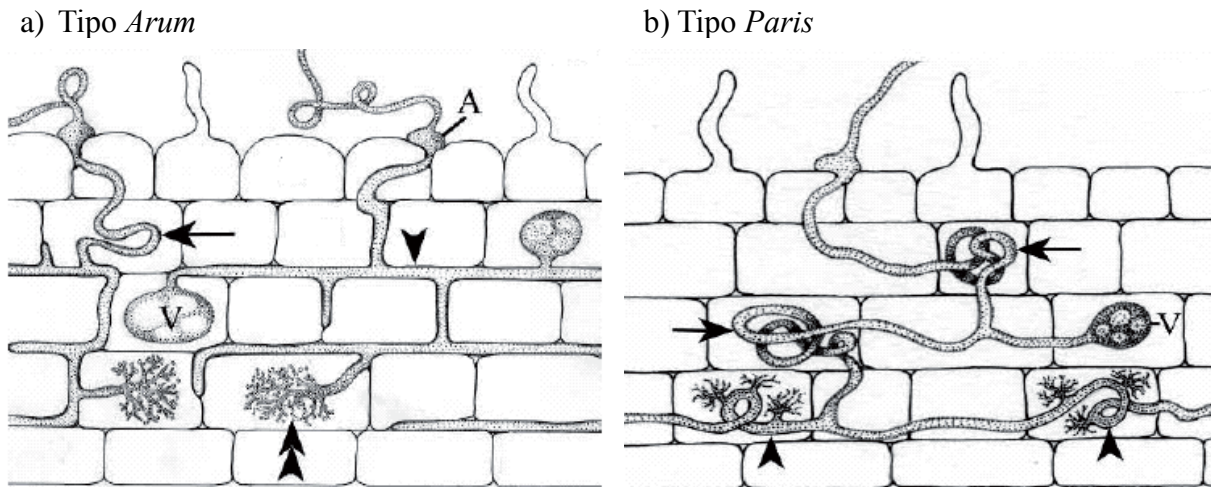


Figura 1. Tipos de asociación micorrízica arbuscular. a) Tipo *Arum*, caracterizado por hifas que crecen de forma intercelular (cabeza de flecha). b) Tipo *Paris*, caracterizado por hifas con crecimiento intracelular (cabeza de flecha). Se aprecian vesículas (v); el apresorio (A); hifas (flechas) y arbúsculos (dos cabezas de flechas). Fuente: Barrera (2009).

Las estructuras externas de los HMA son hifas que forman abundante micelio que se ramifica desde la corteza de la raíz y se extiende hacia el suelo, donde produce las esporas, estructuras de resistencia y reproducción, formadas asexualmente sobre una hifa sustentora. Las esporas de los HMA pueden encontrarse en el suelo en forma simple o individual, en agregado o en el esporocarpio (González *et al.*, 1998; Alarcón y Ferrera-Cerrato, 1999).

4.4 EFECTOS BENÉFICOS DE LA ASOCIACIÓN MICORRÍZICA ARBUSCULAR

Fue en la primera década del siglo XX cuando se dieron a conocer con cierta precisión los beneficios que brindan los HMA en los ecosistemas y en la agricultura (Montaño *et al.*, 2008). Se han descrito diversos mecanismos que justifican la protección ejercida por los HMA. Algunos son indirectos, tales como la mejora en la nutrición mineral de la planta al facilitar el ciclado de algunos elementos fundamentales para su nutrición, como el fósforo y otros elementos que se retienen fuertemente en el suelo, incrementan la resistencia de las plantas a situaciones de estrés, biótico y abiótico como son: sequía, salinidad, contaminación por metales pesados, hidrocarburos y plaguicidas; mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, benefician la estructura y diversidad de las comunidades vegetales, mejoran el enraizamiento de las plantas y su establecimiento en el suelo y facilitan la sucesión vegetal. Los HMA mantienen por mayor tiempo la funcionalidad de las raíces, mientras que el micelio externo (extramatricial) genera una extensa red de hifas en el suelo que permite a la raíz mayor capacidad de exploración de volumen de suelo. De esta forma el sistema radical micorrizado posee mayor capacidad de absorción, tanto de nutrimentos como de agua, en comparación con aquellas raíces que no tienen la simbiosis establecida. De este modo, la fisiología de la simbiosis micorrízica provee a las plantas mejor capacidad de adaptación, establecimiento y crecimiento. Por otra parte, el suelo

también es favorecido por la actividad de los HMA. En cuanto a la estabilidad del suelo, las hifas permiten la agregación de las partículas de suelo, lo que evita que la pérdida de éste por agentes de erosión sea menor. Además de estos mecanismos indirectos de actuación, hay evidencias de la implicación de otros mecanismos más específicos como son: la inducción de cambios citológicos o histológicos en la raíz, los cuales pueden ir desde un incremento en la lignificación de las células de la endodermis, hasta cambios en las células epidérmicas; cambios en la arquitectura radical de la planta normalmente se produce un incremento en la ramificación del sistema radical; también las micorrizas pueden actuar indirectamente promoviendo cambios en la exudación radical de las plantas y en consecuencia sobre las poblaciones microbianas de la rizósfera y por último se ha propuesto y comprobado, que la activación de los mecanismos de defensa de la planta hospedera como consecuencia de la colonización de la raíz por parte de los HMA, en la medida en que ocurre, aunque sea débilmente, determina una respuesta más rápida de la planta al ataque posterior de un patógeno (Azcón-Aguilar *et al.*, 2004; Alarcón, 2007; González y Maldonado, 2009).

Las plantas con micorriza son más resistentes al ataque de patógenos del suelo o presentan una reducción en los daños provocados por los mismos. Esta protección se ha evidenciado frente a hongos y nematodos fundamentalmente, aunque también frente a bacterias fitopatógenas. La capacidad de proteger a la planta no se puede generalizar a todos los hongos formadores de micorrizas, ni a todos los patógenos. De hecho se han encontrado diferencias significativas en cuanto al grado de protección que confieren distintos ecotipos de HMA. La capacidad de bioprotección depende del sustrato de crecimiento de la planta y sobre todo de las condiciones ambientales (Azcón-Aguilar *et al.*, 2004).

4.4.1 Protección brindada por HMA contra el estrés hídrico

Las relaciones con el agua también pueden verse afectadas a causa de la colonización micorrízica. Por cada metro de raíz colonizada se producen entre 7 y 250 m de hifas externas de HMA, dependiendo de la especie implicada y las condiciones de crecimiento. El micelio extramatricial ha mostrado ser capaz de captar muy eficazmente agua. Al presentar las plantas micorrizadas mayores valores de conductancia estomática y potencial de agua de las hojas en condiciones de estrés. Las hifas son capaces de absorber agua a potenciales más bajos que los pelos radicales, lo que provoca una mayor absorción del agua y, por tanto, que las plantas micorrizadas tengan mayor tasa fotosintética y mayor contenido de agua que las no micorrizadas.

Los mecanismos involucrados aún no están totalmente dilucidados; no obstante, las hipótesis elaboradas al respecto relacionan diferentes aspectos, como son: efectos indirectos a partir de incrementos en la absorción de P; aumentos en la toma de agua a través de los sistemas micorrizados, ya sea por incrementos en la conductividad hidráulica de la raíz o por variación de su arquitectura; modificaciones bioquímicas en la regulación del agua en la planta hospedera por cambios en las señales hormonales o una inducción de respuestas osmorreguladoras de las plantas inoculadas comparadas con los controles (Fernández *et al.*, 2010). Además, los HMA modifican las relaciones hídricas de las plantas mediante diferentes mecanismos, los cuales incluyen una ampliación en el área de superficie de raíces micorrizadas, regulación estomática y una menor resistencia en el transporte del agua y los solutos, mejorando su movilidad en el hospedero. Todo esto se refleja en un incremento en la conductividad hidráulica (Pimienta-Barrios *et al.*, 2009).

4.4.2 Beneficios de los HMA en la nutrición de las plantas

El beneficio que aporta la simbiosis a las plantas está determinado por la actividad del micelio externo del hongo, ya que éste posee mayor capacidad de absorción de los nutrientes del suelo mediante la extensa red de hifas que el hongo puede generar. De este modo, la actividad del micelio coadyuva en la función de la raíz sobre todo cuando ésta ha agotado los nutrientes de la zona del suelo adyacente. El principal beneficio que las plantas reciben es la aportación de P (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 1999). Sin embargo, de la micorrización ocurren efectos directos sobre la nutrición de prácticamente el resto de los elementos esenciales, como: K, N, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu, Cd, Fe y Mo (Fernández *et al.*, 2010).

4.5 ANTECEDENTES DE LOS HMA EN EL CULTIVO DE CHILE

(Capsicum annuum L.)

El sistema radical de plántulas de Chile pre-micorrizadas con *G. intraradices* presenta un menor número de lesiones por *P. capsici*, cuantificándose menos de la mitad de lesiones que en las raíces de plántulas no pre-micorrizadas. Con base en los resultados que obtuvieron pudieron observar que a menor número de raíces en las plántulas micorrizadas, fue menor el número de lesiones producidas por el patógeno. En cuanto a la severidad de la enfermedad, se observó un volumen de necrosamiento mayor en las plántulas no pre-micorrizadas, lo cual estuvo relacionado con un mayor volumen radical total. Al final del experimento, se registró 23.36% de necrosis radical en las plántulas pre-micorrizadas con *G. intraradices*; mientras que, el sistema radical de las plántulas no inoculadas previamente con el HMA presentaron 89.03% de

necrosamiento. La “inmunización” (acumulación de enzimas hidrolíticas y compuestos fenólicos) de plántulas contra patógenos debida a la preinoculación, puede explicar la reducción de la severidad de la enfermedad. El efecto bioprotector de *G. intraradices* se manifestó con 100% de supervivencia de las plántulas, en contraste con 20% de supervivencia de las plántulas tratadas sólo con el patógeno (Espinosa-Victoria *et al.*, 2004).

El crecimiento y desarrollo del sistema radical de las plantas de Chile evaluadas en los tratamientos con HMA, donde se regó al 65% de capacidad de campo cc ($0.27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), se vieron estimulados por el efecto de los HMA, pues mostraron valores superiores de la masa seca al compararse con las desarrolladas en el tratamiento no inoculado. Este comportamiento pudo deberse a que las raíces de las plantas, al estar expuestas a un bajo nivel de humedad en el sustrato, recibieron los beneficios de la simbiosis de estos microorganismos, lo que permitió una mayor absorción de agua y nutrientes, y contribuyó más eficientemente al incremento de este órgano de la planta en condiciones de estrés hídrico. Se ha demostrado que las hifas del hongo mejoran indicadores como la conductividad hidráulica de la raíz, lo cual disminuye su resistencia al paso del agua, aspecto que ha sido comprobado en plantas de *Ulmus americana*. Además, la simbiosis hongo-planta es típicamente mutualista, pues el hongo depende de la planta para la obtención de fotoasimilados y la planta recibe a cambio una variedad de beneficios, que le permite incrementar su crecimiento y mejorar sus relaciones hídricas. Cuando la humedad del sustrato se mantuvo a un nivel cercano al 90% cc ($0.37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), no se observaron diferencias significativas en la biomasa entre los tratamientos estudiados. Estos resultados indican que, para altos niveles de humedad en el sustrato, estas cepas no manifestaron influencia que favoreciera el crecimiento radical, lo que se puede atribuir a que las plantas tuvieron agua disponible en el

sustrato durante todo el desarrollo de su ciclo biológico para satisfacer sus necesidades hídricas (Montero *et al.*, 2010).

En un experimento en el que se inocularon ocho especies diferentes de chile (*Capsicum annuum* L.) con dos fuentes de inóculo a base de esporas, micelio y raíces micorrizadas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) [*Glomus intraradices* (Gi) y *Gigaspora margarita* (Gm)]. Se reportó que en general las ocho especies de chile (Karaisali, N52, Hatay Ince Sivri, Alata 42, Demre, Kandil, Chile serrano, Cayenne) tuvieron mayor peso seco con respecto al testigo que no se inoculó con HMA y también se observó una relativa dependencia micorrízica en las variedades H52 con mayor dependencia y Karaisali con la menor Tabla 1 (Sensoy *et al.* 2007)

En otro estudio en el que se inocularon plantas de chile con *Glomus mosseae* fue efectiva al disminuir los síntomas de la enfermedad producida por la infección de *P. parasítica*. Las evidencias sugieren que una combinación local y sistémica de los mecanismos son responsables de estos efectos de bioprotección. Grandes daños mostrados por la planta infectada con el patógeno, coinciden con una gran acumulación de H₂O₂ en las hojas. Desde que el H₂O₂ participa como un componente importante de la respuesta hipersensitiva en las células muertas que rodean el sitio de infección, un incremento en este componente es la probable causa de una área muy sensitiva. Esto sugiere la existencia de un proceso de señalización local y sistémica en las plantas micorrizadas, tal vez precedido por la transferencia de la actividad del H₂O₂ en las células adyacentes al contacto y además a través de sitios distantes (Alejo-Iturvide *et al.* 2007).

5. LITERATURA CITADA

- Alarcón A. 2007. Micorriza arbuscular. In: Ferrera-Cerrato R, Alarcón A (eds) Microbiología agrícola: hongos, micro y macrofauna, control biológico y planta/microorganismo. Trillas, México, pp 90-119
- Alarcón A., y R. Ferrera-Cerrato. 1999. Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra Latinoamericana* 17: 179-191
- Alejo-Iturvide F, M. A. Márquez-Lucio, I. Morales-Ramírez, M. S. Vázquez-Garcidueñas, V. Olalde-Portugal. 2007. Mycorrhizal protection of chili plants challenged by *phytophthora capsici*. *Eur J Plant Pathol* 120:13-20
- Armenta B., A. D., C. García G., J. R. Camacho B., M. A. Apodaca S., L. G. Montoya., y E. Nava P. 2010. Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. Ra Ximhai Universidad Autónoma Indígena de México. Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. 6: 51-56
- Azcón-Aguilar C., J. M. Pozo, J. M. Barea. 2004. Papel de las micorrizas arbusculares en la protección de la planta frente a patógenos del suelo: posibles mecanismos implicados. In: Frías JT, Olalde V, Ferrera-Cerrato R (eds) Avance en el conocimiento de la biología de las micorrizas. Universidad de Guanajuato, México, pp 50-65
- Azofeifa A., M. A. Moreira. 2008. Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. Hot) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 32: 19-29

- Barrera, E. S. 2009. El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. Artículo de revisión. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Colombia 7: 124-132
- Bravo L., Á. G., G. Galindo G., y M. D. Amador R. 2006. Tecnología de Producción de Chile Seco. No. 5. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias 195 p.
- Cardona G., C. P. Peña-Venegas, A. Arcos. 2008. Ocurrencia de hongos formadores de micorriza arbuscular asociados a ají (*Capsicum* sp.) en la Amazonia colombiana. Agronomía Colombiana 3: 459-470
- Carreño N., A. Vargas, A. J. Bernal, S. Restrepo. 2007. Problemas fitopatológicos en especies de la familia Solanaceae causados por los géneros *Phytophthora*, *Alternaria* y *Ralstonia* en Colombia. Una revisión. Agronomía Colombiana 25: 320-329.
- Espinosa-Victoria D, D. González-Mendoza, J. Placencia-de la Parra, R. García-Espinosa. 2004. Reducción de la incidencia de *Phytophthora capsici* Leo en el sistema radical de plántulas de chile pre-micorrizadas con *Glomus intraradices*. TERRA Latinoamericana 22:317-326
- Fernández F. 2003. La Simbiosis Micorrízica Arbuscular. In: Rivera R, Fernández K (eds) El manejo efectivo de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible. Estudio de caso: Caribe, pp 1-44.
- Fernández K., F. Fernández, R. Rivera, V. Olalde. 2010. Micorrización *in vitro* e *in vivo* de plántulas de papa (*Solanum tuberosum* var. Alfa.). Cultivos Tropicales 31: 21-31
- Galindo G. G., C. B. Cabañas. 2006. El cultivo de chile en Zacatecas. In: Bravo L., A. G, Galindo G. G., Amador D., M. D. (eds) Tecnología de producción de chile seco. Libro técnico No 5. INIFAP Zacatecas, pp 5-18

- García-Rodríguez M. R., E. Chiquito-Almanza, P. D. Loeza-Lara, H. Godoy-Hernández, E. Villordo P., J. L. Pons-Hernández, M. M. González-Chavira, J. L. Anaya-López. 2010. Producción de chile ancho injertado sobre criollo de morelos 334 para el control de *Phytophthora capsici*. *Agrociencia* 44: 701-709
- González C. Ma. Del C., R. Ferrera-Cerrato, J. Pérez-Moreno. 1998. Biotecnología de la micorriza arbuscular en fruticultura. Universidad Autónoma de Tlaxcala y Colegio de Postgraduados, México, 131 pp.
- González C. Ma. del C., M. I. E. Maldonado. 2009. Manual básico para el cultivo de micorrizas arbusculares, Obtención de cultivos monospóricos y monoxénicos. Instituto Politécnico Nacional, México, 43 pp.
- González-Monterrubio C. F., A. Monrroy-Ata, E. M. García-Amador, M. S. Orozco-Almanza. 2005. Influencia de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) en el desarrollo de plántulas de *Opuntia streptacantha* Lem. sometidas a sequía, en condiciones de invernadero. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas* 8: 5-10
- Hermosillo-Cereceres M. A., J. González-García, S. J. Romero-Gómez, M. Luján-Favela, A. Hernández-Martínez, S. Arévalo-Gallegos. 2008. Relación genética de materiales experimentales de chile tipo chilaca con variedades comerciales. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 14: 301-307
- Hodge A., T. Helgason, A. H. Fitter. 2010. Nutritional ecology of arbuscular mycorrhizal fungi. *Fungal Ecology* 3: 267-273

- Dell' J. A., P. Rodríguez, A. Torrecillas, Asun Morte, y M. de J. Sánchez-Blanco. 2002. Influencia de la micorrización en el crecimiento y las relaciones hídricas de plantas de tomate sometidas a un ciclo de sequía y recuperación. *Cultivos Tropicales* 23: 29-34.
- Montaño A., N. M., R. S. L. Camargo, S. R. García, A. A. Monroy. 2008. *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Mundi Prensa México. 266 p
- Montero, L., C. Durante, R. Cun, J. A. Cabrera, y P. J. González. 2010. Efectividad de biofertilizantes micorrízicos en el rendimiento del pimiento (*Capsicum annuum* L. var. Verano 1) cultivado en diferentes condiciones de humedad del sustrato. *Cultivos Tropicales* 31: 11-14.
- Olvera, G. J., R. Sánchez, B. R. Ochoa, C. F. Rodríguez. 1998. Una hortaliza de México para el mundo. *Claridades Agropecuarias* 56: 3-5
- Patiño, T., C. O. 2010. Solubilización de fosfatos por poblaciones bacterianas aisladas de un suelo del valle del Cauca. Estudio de biodiversidad y eficiencia. Tesis de Doctorado en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. pp. 18.
- Pimienta-Barrios E., Zañudo-Hernández, E. López-Alcocer. 2009. Efecto de las micorrizas arbusculares en el crecimiento, fotosíntesis y anatomía foliar de plantas jóvenes de *Agave tequilana*. *Acta Botánica Mexicana* 89: 63-78
- Reyes R., E., H. Salinas G., A. G. Bravo L., L. E. Padilla B. 2001. Tecnología de producción de chile seco en el estado de Zacatecas. *Terra Latinoamericana* 19: 83-88
- Schüßler, A. Walker, C. 2010. *The Glomeromycota*. Gloucester, England.

Sensoy, S., S. Demir, O. Turkmen, C. Erdinc and O. Burak S. 2007. Responses of some different pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes to inoculation with two different arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientia Horticulturae* 113: 92–95.

Velasco V., J., R. Ferrera C., J. J. Almaraz S. 2001. Vermicomposta, micorriza arbuscular y *azospirillum brasilense* en tomate de cáscara. *Terra latinoamericana* 19: 241-248.

CAPÍTULO I

SELECCIÓN DE CEPAS NATIVAS DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES AISLADAS DE DOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CHILE (*Capsicum annuum* L.) MIRASOL

RESUMEN

La diversidad funcional de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) puede depender de la procedencia de los aislamientos, más que de la especie fúngica. Por lo anterior, se seleccionaron cepas nativas de HMA aisladas de suelos de sistemas de producción de Chile Mirasol tecnificado (TEC) y tradicional (TRA), en cultivos trampa de plántulas de Chile Mirasol considerando su efecto en la promoción del crecimiento de las plantas, en condiciones de invernadero. Se establecieron 14 tratamientos con las muestras TEC, y 15 con las muestras TRA, cada uno con ocho repeticiones. Durante 40 días, se midió la altura de planta y la biomasa seca (hojas, tallo, raíz y total), en tanto que la colonización micorrízica se evaluó a los 90 días después del trasplante. Los tratamientos TEC-11 y TRA-14 fueron los que dieron los resultados más consistentes ya que ambos presentaron la mayor producción de biomasa seca total (0.66 y 0.69 g, respectivamente), mientras que sus porcentajes de colonización en raíz fueron del 34 y 37%, respectivamente.

Palabras clave: *Capsicum*, micorrizas, suelo, colonización de la raíz, producción tecnificada y tradicional.

**SELECTION OF NATIVE STRAINS OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL
FUNGI ISOLATED FROM TWO PRODUCTION SYSTEMS OF PEPPER
(*Capsicum annuum* L.) MIRASOL**

ABSTRACT

The functional diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) may depend on the provenance of the fungal isolates rather than the fungal species. Thus, this study consisted on screening native strains of AMF isolated from soil samples collected at two locations of pepper crop production with high inputs (TEC) or traditional management (TRA). Soil samples were inoculated in pepper seedlings (cv. Mirasol) to assess their effects on plant growth promotion under greenhouse conditions. There were set 14 treatments for samples from TEC, and 15 treatments for samples form TRA, with eight replicates each. During 40 days, the plant height and dry biomass (leaves, stem, roots, and total), and mycorrhizal colonization was determined after 90 days of transplanting. Treatments TEC-11 and TRA-14 showed more consistent effects since both treatments had the highest production of total dry biomass (0.66 and 0.69 g, respectively), and their mycorrhizal colonization were 34 and 37%, respectively.

Keywords: *Capsicum*, mycorrhizae, soil, root colonization, high input system, traditional production.

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la simbiosis micorrízica arbuscular tiene enorme trascendencia ya que en diversos estudios se ha demostrado el efecto benéfico de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el mejoramiento de la nutrición, aprovechamiento de agua, crecimiento y adaptación de las plantas ante diversas condiciones de estrés intuido tanto por factores bióticos como por factores abióticos (Ferrera-Cerrato y Alarcón, 2004).

Por los beneficios propios de esta asociación simbiótica mutualista (hongo-planta) en los últimos años se han realizado investigaciones para determinar el efecto de aislamientos de HMA sobre sistemas de producción agrícola, con el fin de lograr sistemas de producción sostenibles y competitivos (Serralde y Ramírez, 2004). Sin embargo, no todas las combinaciones HMA-planta son compatibles, con algunos hongos llega a ser más beneficioso para un hospedero y la adaptación entre ellos es determinada por condiciones edafoclimáticas, mostrando notables diferencias estructurales y funcionales entre especies e incluso entre morfotipos de las mismas especies de hongos (Castillo *et al.*, 2009).

Es necesario reconocer los sitios donde la inoculación con HMA es beneficiosa (sitios donde el potencial del inóculo es bajo o donde los hongos son inefectivos), y producir y utilizar inóculos de los hongos más efectivos (Salas y Blanco, 2000). Entre las actividades a mejorar esta el de seleccionar microorganismos nativos de la región en la producción de biofertilizantes, ya que así se dan mayores posibilidades del establecimiento y multiplicación del mismo en el suelo (Armenta *et al.*, 2010); debido a que la diversidad funcional de los HMA puede depender de la

procedencia de los aislamientos, más que de la especie fúngica (Robson *et al.*, 1994; Brundrett *et al.*, 1996, citados por Trejo *et al.*, 2011). Del mismo modo, morfotipos de la misma especie de HMA, colectados de diferentes sitios confieren diferente beneficio fisiológico a la misma especie de planta (Blanco y Salas, 1997).

Existen diferencias en el proceso de colonización de las distintas cepas de HMA, los cuales se evidencian en el comportamiento fúngico, agronómico y bioquímico (Rodríguez *et al.*, 2004). Por lo anterior, las micorrizas introducidas en un sistema agroecológico deben evaluarse con base en su efectividad en el cultivo deseado (Garza-Cano *et al.*, 2005). El conocimiento concerniente a la relación específica entre plantas y hongo es importante para la utilización exitosa de HMA bajo condiciones particulares (Kapoor *et al.*, 2008).

La respuesta a la inoculación micorrízica depende de múltiples factores tales como: la dependencia micorrízica de las plantas, la concentración de P en la solución del suelo, el número de propágulos infectivos y la efectividad de los HMA para incrementar la absorción de P (Jaramillo *et al.*, 2004). Una combinación entre los parámetros de crecimiento de planta tales como peso aéreo y de raíces con los de colonización micorrízica resulta adecuada para identificar de manera rápida las potenciales cepas de HMA a introducir (Covacevich y Echeverría, 2010)

México es el principal país productor y exportador de chile verde a nivel mundial, y el sexto en chile seco. En el año agrícola de 2009 se sembraron más de 144 mil hectáreas a nivel nacional, destacando los estados de Chihuahua, Sinaloa y Zacatecas que aportaron más de la mitad del volumen de la producción total (Galindo-Reyes *et al.*, 2011). Uno de los cultivos hortícolas más importantes en el estado de Zacatecas, México es el del chile seco (*Capsicum annuum* L.) tanto por el valor de la producción como por los empleos que genera en actividades

directas e indirectas. La producción de chile seco es sensible al efecto adverso del manejo agronómico como de los organismos nocivos que reducen el rendimiento y calidad de esta hortaliza (Velásquez-Valle *et al.*, 2011).

1.2 MATERIALES Y MÉTODOS

CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CHILE MIRASOL ESTUDIADOS

SISTEMA DE PRODUCCIÓN TECNIFICADO

Las labores culturales que se hacen al suelo son: un volteo, un rastreo, el nivelado, levantamiento de camas y durante el ciclo del cultivo se dan tres escardas. Antes de iniciar con la fertilización química el productor incorporar al suelo 20 t ha⁻¹ de estiércol seco de bovino, después de esto aplica de fondo o base 150 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio (20.5-00-00) y 500 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (18-46-00), hecho esto, el productor no aplica más fertilizante. Se reanuda la fertilización hasta que inicia la etapa de producción en la cual aplica 75 kg ha⁻¹ de nitrato de potasio (12-00-45) y antes de que la planta deje de producir, finaliza con la aplicación de 25 kg ha⁻¹ de sulfato de potasio (00-00-52). Durante el ciclo del cultivo hace cuatro aplicaciones foliares con un fertilizante que aporta Fe, Mn, Zn, B, Cu y Mo, en mg L⁻¹: 1.5, 0.8, 0.3, 0.4, 0.06 y 0.06, la primera aplicación foliar la aplica a los 60 días después del trasplante, las restantes cada 15 días hasta completar las 4 foliadas; en la segunda aplicación foliar mezcla con azufre soluble como fungicida para la prevención de enfermedades al follaje. A los tres meses de estar establecido el cultivo se aplican 2 kg ha⁻¹ de un fungicida para combatir problemas como

los ocasionados por el hongo *Phytophthora capsici* que provoca la enfermedad conocida como secadera; para el control de la maleza, cinco días antes del trasplante se aplican 2 kg ha de Trifluralina. El sistema de riego se mantiene dándole lavados a la cintilla con 6 L ha⁻¹ de ácido fosfórico. Los riegos se dan cada ocho días y de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo varían las horas de riego que van desde 4 h al inicio del ciclo, aumentando a 6 h en la floración para culminar con 12 h en la etapa de fructificación. El arreglo topológico de la plantación es en camas con dos hileras de plantas y una cintilla de riego al centro de la cama; la distancia entre hileras y plantas es de 45 y 35 cm respectivamente, con una densidad de 35 mil plantas ha⁻¹. Con este sistema de producción el productor tiene un rendimiento aproximado de 3.3 t ha⁻¹.

SISTEMA DE PRODUCCIÓN TRADICIONAL

Como labores culturales el productor solamente hace el surcado para tirar el fertilizante de fondo o base, aplicando directamente al suelo 100 kg de sulfato de amonio (20.5-00-00) y 100 kg de súper fosfato de calcio simple (00-20.5-00), a la mitad del ciclo del cultivo durante el riego aplica 3 t ha⁻¹ de estiércol seco de bovino y tres bultos de cal agrícola. El arreglo topológico de la plantación es en surcos, la distancia entre surcos es de 90 cm y entre plantas es de 35 cm dando aproximadamente 31 mil plantas ha⁻¹. El riego es rodado o también llamado por gravedad. Con este sistema de producción el productor tiene un rendimiento promedio aproximado de 1.2 t ha⁻¹.

MUESTRAS DE SUELO RIZOSFÉRICO (INÓCULO)

La recolección del suelo se realizó en el mes de noviembre de 2011, durante la etapa final del ciclo del cultivo. Se recolectaron al azar 15 muestras de suelo rizosférico de plantas de chile Mirasol, tratando de cubrir toda el área de producción tradicional y 14 muestras de suelo del área

de producción tecnificada (alrededor de 1 kg por cada punto) a una profundidad de 10 a 20 cm. Las muestras de suelo se depositaron en bolsas de polietileno, etiquetándolas con el nombre de la parcela de procedencia, el número de muestra y el lugar de origen del suelo, para su posterior traslado al Colegio de Postgraduados (CP); en donde se llevó a cabo esta etapa de investigación, al igual que la caracterización física y química de los suelos de cada sistema de producción. En el (Cuadro 2).

SITIO EXPERIMENTAL

El experimento se llevó a cabo en los invernaderos de cristal del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos (Montecillo, Municipio de Texcoco, Estado de México) con coordenadas geográficas 19°30' N y 98°53' W, a 2220 msnm. El clima que predomina es templado semi-seco, con una temperatura media anual de 15.9 °C, con heladas poco frecuentes y una precipitación pluvial media anual de 686.0 mm.

MATERIAL VEGETAL, SIEMBRA Y TRASPLANTE

Se usó semilla criolla de chile Mirasol, este material vegetal ofrece frutos delgados, largos y puntiagudos, que al madurar se tornan de un color rojo a rojo oscuro, su longitud va de 9 a más de 20 cm y 3 cm en su parte más ancha. Esta semilla fue seleccionada por el productor directamente de la parcela durante aproximadamente 20 años por lo cual esta adaptada a la región productora de chile de la comunidad de Chaparrosa que pertenece al municipio de Villa de Cos, Zacatecas. La siembra se hizo el 3 de febrero de 2012, desinfectando la semilla previamente con dos fungicidas comerciales. El trasplante se llevó a cabo el 15 de mayo de 2012 depositando 10 g de inóculo de HMA sobre el sistema radicular de cada planta.

Cuadro 2. Características físicas y químicas de los suelos utilizados como inóculo micorrízico y cantidad de esporas de HMA.

Parámetros evaluados	Metodología usada	Unidades de medición	Fuente de inóculo	
			Parcela tradicional	Parcela tecnificada
pH	1:2* H ₂ O		8.4	6.9
CE	1:5 H ₂ O	dS m ⁻¹	0.06	0.05
M.O.	Walkley-Black	%	1.2	0.7
N	Kjedahl	%	0.06	0.04
P	Olsen	mg kg ⁻¹	5	60.4
K	NH ₄ Oac 1 N pH 7	cmol kg ⁻¹	1.7	1.2
Ca	NH ₄ Oac 1 N pH 7	cmol kg ⁻¹	10.3	3.7
Mg	NH ₄ Oac 1 N pH 7	cmol kg ⁻¹	2.7	1.6
Na	NH ₄ Oac 1 N pH 7	cmol kg ⁻¹	0.5	t
N-NO ₃	KCl 2 N	mg kg ⁻¹	23	41.4
N-NH ₄	KCl 2 N	mg kg ⁻¹	10	7.9
Arena			67.2	80.6
Limo	Textura Boyoucos	%	15.2	8.9
arcilla			17.6	10.6
Clasificación textural	-	-	Franco arenoso	Arenoso franco
B	Azomectine – H	mg kg ⁻¹	0.9	0.9
Fe	DTPA	mg kg ⁻¹	2	4.3
Cu	DTPA	mg kg ⁻¹	0.6	0.4
Zn	DTPA	mg kg ⁻¹	0.3	0.8
Mn	DTPA	mg kg ⁻¹	6.6	8.1
Número de esporas	Tamizado y decantado	Esporas en 100 g suelo seco	2450	847

t=trazas

SUSTRATO Y CONTENEDORES

Para el establecimiento del almácigo se utilizó como sustrato Kekila y agrolita y para el trasplante se empleó tezontle (roca volcánica roja), con granulometría de 1.0 mm de diámetro. El tezontle se lavó varias veces con agua corriente y fue esterilizado posteriormente con el fungicida a base de dióxido de hidrogeno al 27% para eliminar posibles agentes fitopatógenos. La siembra del almacigo se hizo en charolas de poliestireno (unicel) y se desinfectaron con cloro (hipoclorito de sodio) en agua; para el trasplante como contenedores se utilizaron vasos de unicel con capacidad de 1 litro los cuales se esterilizaron con alcohol etílico puro 96° G. L.

TRATAMIENTOS Y UNIDAD EXPERIMENTAL

Se establecieron 30 tratamientos (Cuadro 3), considerando las 15 muestras de suelo tradicional y de las 14 del suelo tecnificado, como inóculo; también se estableció un tratamiento testigo sin inocular; cada tratamiento contó con ocho repeticiones. La unidad experimental consistió de una planta por cada contenedor lo cual dio un total de 240 plantas.

Cuadro 3. Definición de los 30 tratamientos evaluados en el experimento

Tratamiento	Descripción
TEC-1 a TEC-14	De las 14 muestras de suelo que se colectaron en la parcela tecnificada se tomaron cada uno de los 15 tratamientos
TRA-1 a TRA-15	De las 15 muestras de suelo que se colectaron en la parcela tradicional se tomaron cada uno de los 15 tratamientos
TESTIGO	Sin adición de inóculo (suelo)

VARIABLES EVALUADAS

Altura de planta (AP), medida desde el nivel del sustrato hasta el ápice de la rama más alta. Para medir la altura se utilizó una regla de madera de un metro de altura; el peso seco de hojas (PSH); peso seco de tallo (PST) y peso seco de raíz (PSR) se evaluaron hasta el final de que se hicieron las otras evaluaciones, también el porcentaje de colonización del hongo micorrízico arbuscular (%CT) el cual se evaluó al final del ciclo, en muestras de raíces que se extrajeron y se procesaron por el método de Phillips y Hayman (1970, citado por González *et al.*, 2007), que consiste en coloración de raíces y su observación en el microscopio.

TINCIÓN DE RAÍCES Y DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE COLONIZACIÓN

Para la evaluación de la colonización micorrízica las raíces de chile fueron teñidas siguiendo el método de Phillips y Hayman (1970, modificado por Sieverding, 1983, citados por González *et al.*, 2007). El cual consiste en: a) clareo, b) blanqueo, c) acidificación, d) tinción, y e) decoloración.

Primero las raíces del chile se lavaron con agua corriente para retirar el exceso de sustrato, posteriormente se cortó la cantidad suficiente para meter en las cápsulas esterilizables, dentro de las capsulas se puso velo de novia para evitar que durante el proceso se perdiera material, después de esto las capsulas se depositaron en un vaso de precipitado de 2 L en donde se agregó hidróxido de potasio (KOH) al 10%, el suficiente para cubrir las capsulas;

posteriormente se dejaron durante tres días a temperatura ambiente este paso se hizo dos veces para que las raíces quedaran bien clareadas, después el KOH se retiró y se lavaron las capsulas para agregar peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 10% durante 10 minutos, en seguida se lavó el peróxido con agua destilada para poder agregar el ácido clorhídrico (HCl) al 10% y se dejó por 10 minutos a temperatura ambiente pasados los 10 min se retiró el HCl pero no se lavaron las raíces para continuar con la aplicación del azul de tripano (0.05%) y se calentó a 10 libras de presión por 10 minutos y finalmente después de transcurrido el tiempo las capsulas se dejaron sumergidas en este mismo material para que se conservaran hasta su posterior montaje en portaobjetos para poder observar al microscopio las estructuras del hongo micorrízico.

El montaje se hizo lavando las capsulas para retirar el exceso del azul de tripano, después se colocaron los segmentos de raíz en cajas Petri, se agregó un poco de agua para poder manipularlas con una aguja de disección y colocarlas en los portaobjetos, se colocaron de 15-25 segmentos de raíces paralelas unas a otras de aproximadamente 1.5 cm cada una; después de montadas las raíces se les puso unas gotas de lactoglicerol para en seguida colocar los cubreobjetos. Para realizar la evaluación se observó al microscopio con el aumento de 40X y se realizaron tres pasajes equidistantes por laminilla. Al revisar cada uno de los campos ópticos donde se encontró un segmento que contenía vesículas y/o arbusculos, independientemente de la intensidad de micorrización se da el valor de uno para la evaluación por estructuras y total. El porcentaje de colonización por estructuras y total se obtuvo mediante una regla de tres. Por tratamiento se tomaron tres repeticiones y por repetición dos replicas, dando un total de seis láminas portaobjetos para cada tratamiento.

DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para la distribución de los 30 tratamientos con sus ocho repeticiones, se utilizó un diseño experimental completamente al azar, y cada uno de los 30 tratamientos estudiados tuvieron ocho repeticiones. A cada variable evaluada se le hizo un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias por el criterio de Tukey al 5% de probabilidad en el error ($p \leq 0.05$). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa para el análisis estadístico, del inglés, Statistical Analysis Software (SAS), versión 8.1. Para el análisis del porcentaje de colonización se transformaron los datos que se obtuvieron con la fórmula del arcoseno.

1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

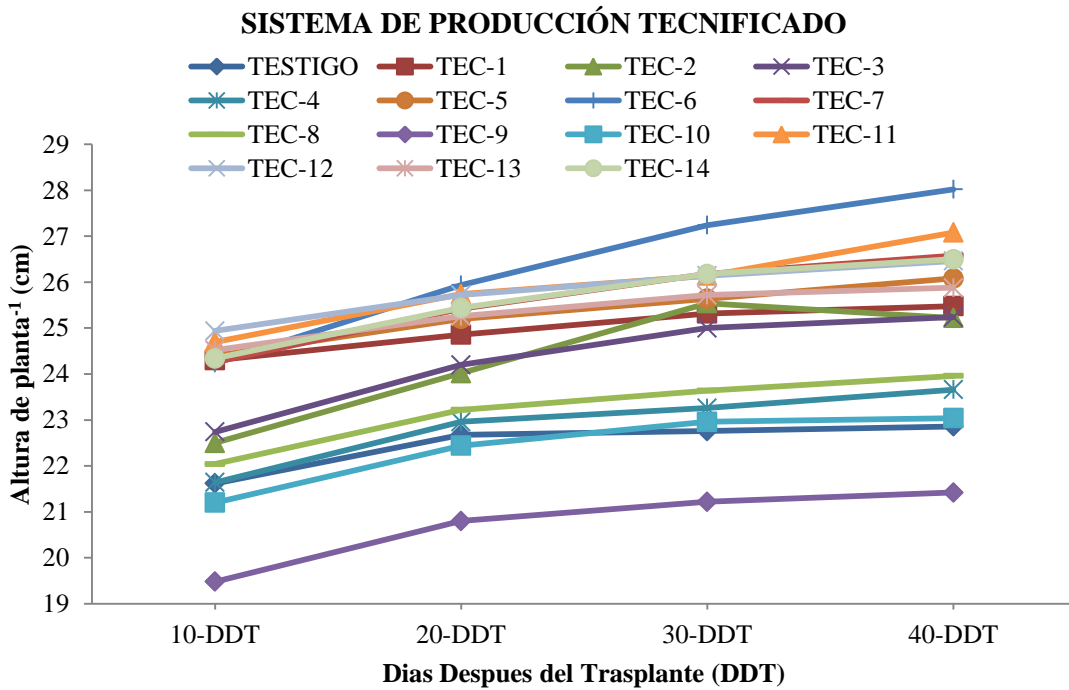
ALTURA DE PLANTA

Al momento del trasplante se tomaron como referencia 10 plantas a las cuales se les midió la altura y en promedio fue de 22 cm, se hizo esto para saber las condiciones del material biológico al comienzo del experimento, esta información permite comprender cómo es que de acuerdo a los resultados del análisis estadístico las dos fuentes de inóculo de HMA evaluadas presentaron efectos significativas en la altura de las plantas de chile Mirasol con respecto al testigo y entre tratamientos (Figura 2). El tiempo que transcurrió de la primera a la segunda evaluación fue en el que las plantas lograron alcanzar su mayor crecimiento, esto es de los 10 a

los 20 días después del trasplante (DDT), a partir de los 30 DDT el aumento en tamaño de las plantas fue mínimo por lo que sólo se hicieron evaluaciones hasta los 40 DDT.

Con la fuente de inóculo del sistema de producción tecnificado (TEC), el testigo alcanzó una altura promedio de 22 cm, mientras que entre tratamiento se tuvieron plantas con 21 cm la más baja y los 26 cm la más alta (Figura 2a). Los resultados obtenidos con la fuente de inóculo del sistema de producción tradicional (TRA) fueron muy similares ya que el testigo promedió una altura de 23 cm y el tamaño de las plantas con los tratamientos estuvo entre los 23 cm la más chica y la más grande con 25 cm (Figura 2b). En una investigación realizada por Yildiz (2010) reportó que no se presentaron efectos significativos en el incremento de la altura de plantas de chile (cv Çorbaç1) por la inoculación con una cepa nativa de HMA (13.8 cm) y otra comercial (14.7 cm) presentando estas plantas crecimiento similar entre ambas y con respecto al control (13.2 cm); contrario a lo reportado en la presente investigación. Resultados en la misma directriz que los presentes fueron obtenidos por Castillo *et al.* (2009) quienes al probar HMA nativos y comerciales en plantas de chile (cv. Cacho de Cabra), derivaron en incrementos de altura siendo mayor la de los tratamientos con inóculo nativo, seguidos del inóculo comercial y al final el control sin inocular.

a)



b)

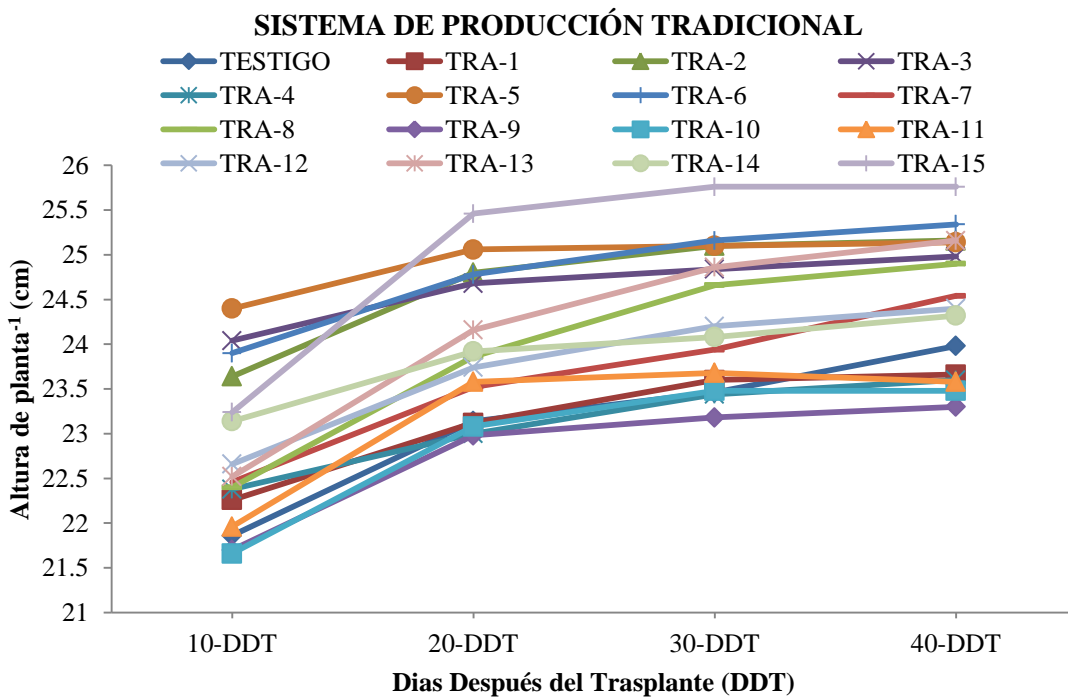


Figura 2. Altura de plantas de chile Mirasol en función del efecto de inóculo de HMA proveniente de suelo de los sistemas de producción tecnificado a), tradicional b) y un testigo sin inocular a los 10, 20, 30 y 40 DDT. Promedios de cinco repeticiones.

PESO SECO DE HOJA, TALLO, RAÍZ Y PESO SECO TOTAL

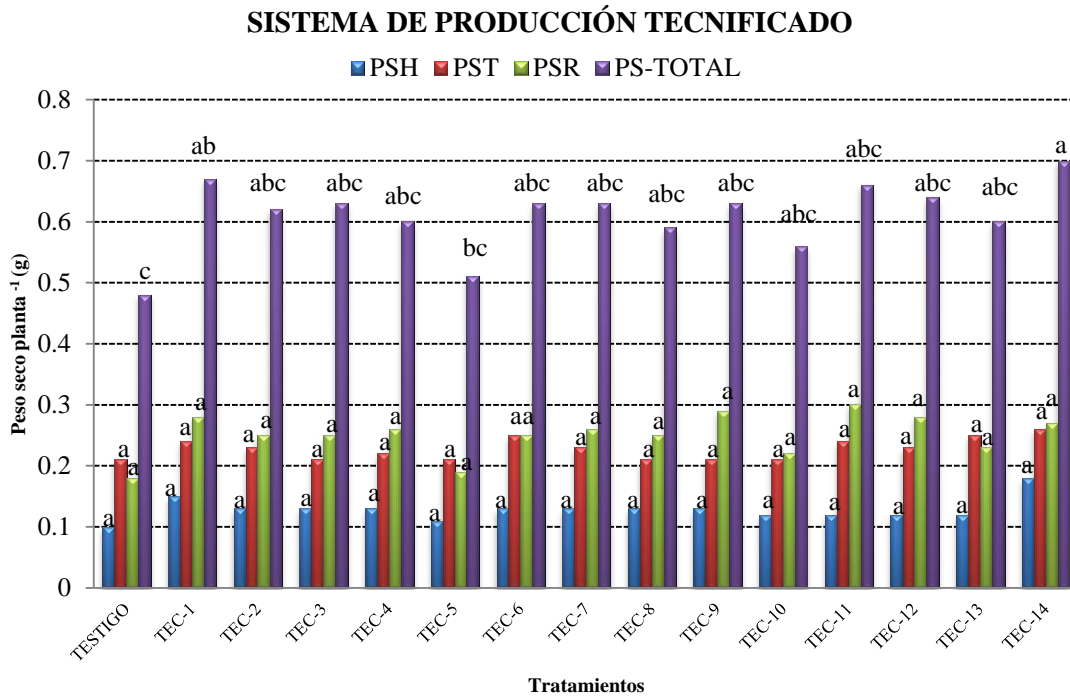
De las 10 plantas de chile que se tomaron como referencia al inicio del experimento además de la altura también se evaluó el peso seco de hoja, tallo y raíz; los valores registrados para estos parámetros al comienzo del experimento fueron de 0.1 g tanto para peso seco de hoja como de raíz y para el peso seco de tallo fue de 0.2 g, con estos datos ha sido posible evidenciar con mayor claridad como las fuentes de inóculo micorrízico utilizadas afectaron el comportamiento de estas variables. Las plantas de chile establecidas con los tratamientos del inóculo TEC mostraron la misma tendencia de incremento en cuanto a las variables de peso seco tanto de hoja, tallo así como de raíz ya que no se tuvieron diferencias significativas; para la producción de biomasa seca total si se presentaron efectos significativos con respecto al testigo 0.47 g y entre tratamientos 0.5-0.7 g (Figura 3a). En las plantas inoculadas con el inóculo TRA ninguna de las variables de peso seco presentaron diferencias significativas (Figura 3b).

Sin embargo para el parámetro de peso seco de raíz se presentó un incremento por el efecto de los inóculos ya que tomando en cuenta que al momento del trasplante este fue de 0.1 g y a los 90 DDT el peso resultó por encima de 0.2 g para la mayoría de los tratamientos en ambos casos (Figura 3a, 3b) y en algunos tratamientos llegó hasta 0.3 g como en: TEC-11, TRA-12, TRA-13 y TRA-14 lo que no ocurrió con los tratamientos establecidos como testigos sin inocular, los cuales no llegaron a los 0.2 g de peso seco de raíz; esto significa que el efecto por los inóculos se acentuó en esta variable aunque estadísticamente esto no se haya manifestado. Mena-Violante *et al.* (2006) reportaron que no hubo efecto por la inoculación con HMA en el peso seco de raíz de plantas de chile ancho (*Capsicum annuum* L. cv San Luis), contrario a los resultados obtenidos por Ibrahim *et al.* (2011) quienes reportaron que la inoculación con diferentes HMA incrementaron el peso seco de raíz así como el peso seco de brotes en plantas de

chile (*Capsicum annuum* L. cv Demre Sivrisi). La misma tendencia en aumento de peso seco de raíz, de brotes así como del peso seco total es reportada por Sensoy *et al.* (2007) al utilizar dos cepas diferentes de HMA en ocho genotipos de chile (Pimientos picantes y dulces: Karaisali, N52, Hatay Ince Sivri, Alata 42, Demre, Kandil, chile Serrano y Cayenne Long Slim, nueva variedad de chile picante). Este comportamiento no fue observado en todos los genotipos estudiados, lo anterior debido a la dependencia micorrízica de los materiales vegetales utilizados, dando esto, resultados inversamente proporcionales al peso seco de las plantas de chile.

Yildiz (2010) reporta resultados similares en el peso seco de plantas de chile al utilizar cepas nativas y comerciales de HMA, 2.0 y 1.9 g respectivamente al igual que el tratamiento control sin inocular con 1.9 g. Por el contrario, Castillo *et al.* (2009) mostraron que la inoculación de plantas de chile (cv Cacho de Cabra) con HMA comerciales incremento el peso en 60%, mientras que las plantas con el inóculo micorrízico nativo fue de 116% en comparación con el control sin micorriza. En la presente investigación, los efectos de los HMA en las plantas de chile son atribuidos a la procedencia del inóculo.

a)



b)

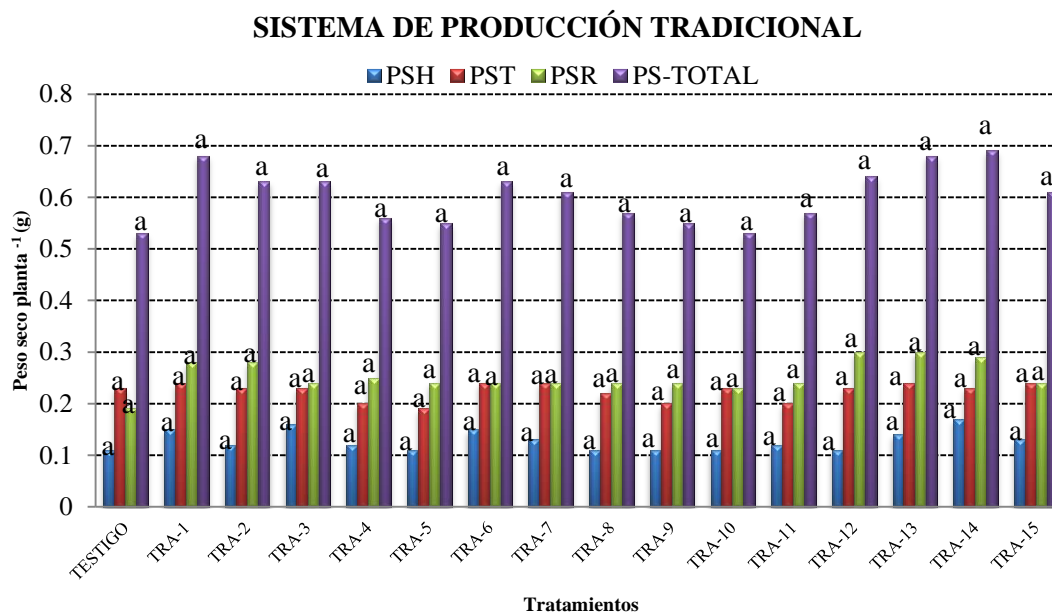


Figura 3. Peso seco de hoja, tallo, raíz y total de plantas de Chile Mirasol, en función del efecto de inóculo proveniente de suelo de los sistemas de producción tecnificado a), tradicional b) y un testigo sin inocular, evaluados a los 90 DDT para cada tratamiento. Promedio de cinco repeticiones.

COLONIZACIÓN DE RAÍZ POR HMA

La infectividad es definida por Yildiz (2010) como la capacidad de los HMA para penetrar y difundirse en la raíz. La evaluación del porcentaje de infección en las raíces de las plantas de chile Mirasol se hizo a los 90 días después de haber sido trasplantadas e inoculadas y como se puede observar en la Figura 4, tanto el inóculo del sistema de producción tecnificado como del tradicional, presentaron colonización de los HMA. Es posible apreciar que todos los tratamientos en cada caso presentaron un porcentaje de colonización muy variado y además esto permite inferir que tanto el inóculo TEC como el TRA contaban con propágulos micorrízicos infectivos ya que no hubo tratamiento alguno sin colonizar.

Estadísticamente no hubo diferencias con la fuente de inóculo TEC entre tratamientos sólo con respecto al tratamiento testigo sin inocular; con el inóculo TRA se presentaron tratamientos estadísticamente iguales al testigo aunque este no haya presentado colonización aunado a esto hubo tratamientos que manifestaron efectos diferentes estadísticamente. Con base en los promedios de colonización de las raíces la micorrización osciló entre los 23.5% y los 40.4% para el inóculo TEC, mientras que la micorrización por efecto del inóculo TRA estuvo en los 12.5% y los 49.5%. Resultados semejantes fueron reportados por Cardona *et al.* (2008) quienes reportaron que diferentes especies del género *Capsicum*, presentaron niveles medios de micorrización que oscilaron entre 33.6 y 41.3%.

En otro estudio hecho por Usuga *et al.* (2008) en el que se inocularon diferentes plantas hospederas (*Brachiaria decumbes*, *Pueraria phaseoloides*, *Sorgum vulgare* y *Tajetes erectacon*) con inóculo nativo de un agroecosistema bananero se obtuvieron porcentajes de colonización de 20.7 a 49.0%, cercanos a los obtenidos en este trabajo. Ortas *et al.* (2011) utilizando diferentes

especies de HMA durante un periodo de tres años en plantas de chile (*Capsicum annuum* L. cv Demre Sivrisi) encontraron que los niveles de colonización fueron del 21 al 66% en plantas inoculadas que en las plantas control sin inocular (0-14%). En un trabajo realizado por Rubio *et al.* (1997) con diferentes hortalizas entre ellas el pimiento encontraron que esta planta tiene una significativa dependencia de la micorrización y fue la micorriza nativa con la que se tuvo una mejor colonización de raíz por lo que recomiendan utilizar cepas de HMA efectivas. Tal efectividad se refiere al potencial que tienen los HMA nativos de un suelo para desarrollar la simbiosis micorrízica e incrementar el crecimiento del hospedero (Jaramillo *et al.*, 2004). Por otro lado, la dependencia micorrízica es definida como el grado en el cual una planta depende de la condición de la micorriza para producir su máximo crecimiento o rendimiento en un nivel dado de fertilidad del suelo (Ortas, 2012).

En una investigación realizada por Sensoy *et al.* (2007) en la que trabajaron inoculando ocho genotipos de chile principalmente pimientos con dos cepas diferentes de HMA reportaron que la intensidad de la colonización varió entre las combinaciones de HMA y los genotipos de chile (17-71%), lo cual muestra también una relativa dependencia a la micorrización. Yildiz (2010) obtuvo que al utilizar cepas nativas de HMA en las hortalizas: pepino, tomate y chile ocurre un mayor porcentaje de colonización 71, 72 y 61%, respectivamente, que al emplear cepas comerciales de HMA 47, 39 y 36%, también reporta que con respecto a las plantas de chile esto no está correlacionado con el desarrollo; tal como lo reportó Castillo *et al.* (2009).

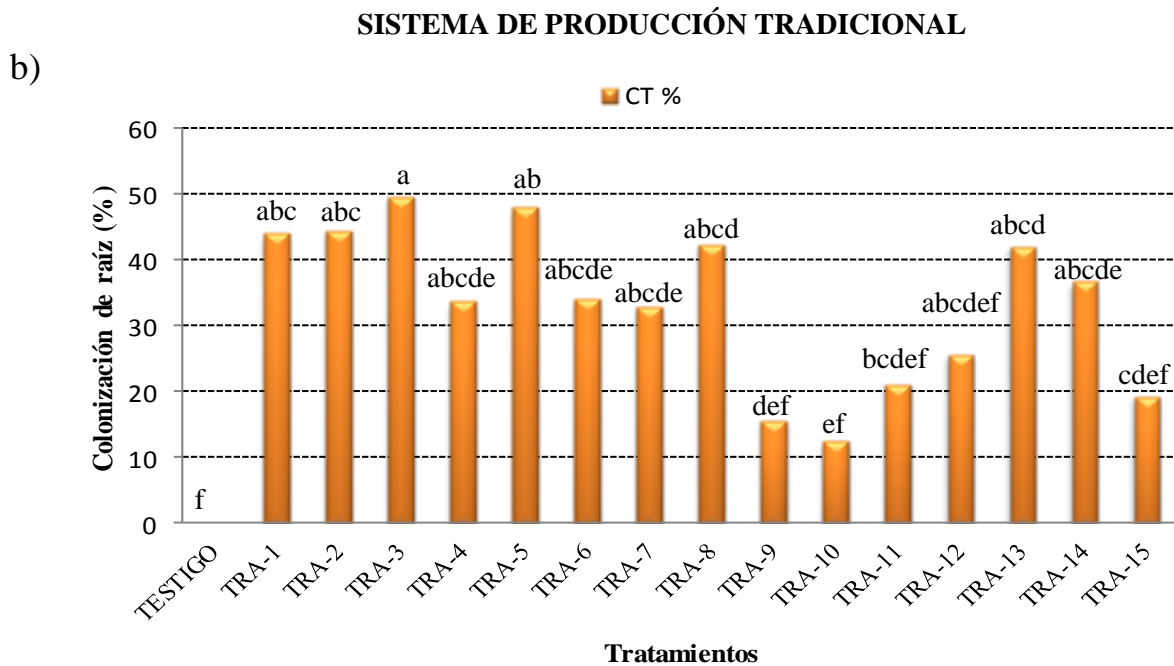
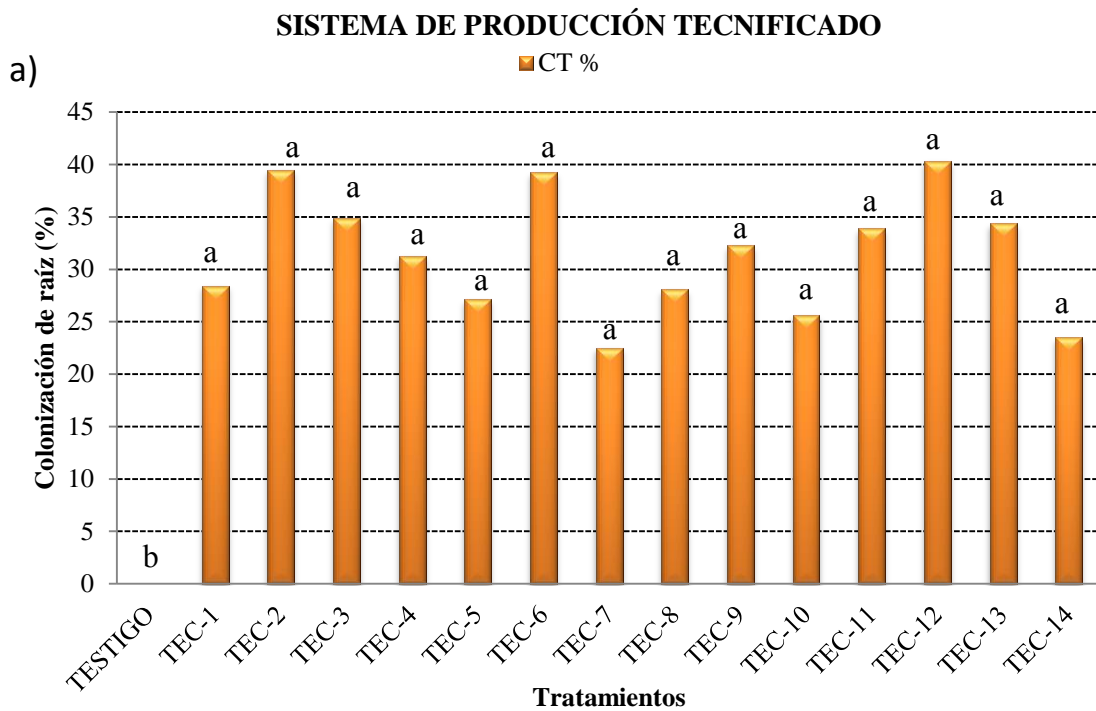


Figura 4. Porcentaje de colonización total de raíces de plantas de chile mirasol por el efecto de inóculo de HMA proveniente de suelo de los sistemas de producción tecnificado a), tradicional b) y un testigo sin inocular, a los 90 DDT para cada tratamiento. Promedio de seis repeticiones.

1.4 CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos por el efecto de las dos fuentes de inóculo tecnificado (TEC) y tradicional (TRA) en las plantas de chile Mirasol, fue posible seleccionar el tratamiento que produjo el efecto más consistente en las variables de crecimiento evaluadas; aunque estadísticamente las diferencias no hayan sido significativas.

Los tratamientos con efectos consistentes fueron el TEC-11 y el TRA-14 ya que ambos presentaron la mayor producción de biomasa seca total con relación al porcentaje de colonización de la raíz.

Las fuentes de inóculo TEC-11 y TRA-14 son materiales biológicos de HMA que pueden ser utilizados para seguir haciendo trabajos de investigación relacionados con el mejoramiento del desarrollo del cultivo de chile mirasol.

1.5 LITERATURA CITADA

- Armenta, B. A. D., C. García G., J. R. Camacho B., M. A. Apodaca S., L. G. Montoya, E. Nava P. 2010. Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. Ra Ximhai. Universidad Autónoma Indígena de México 6: 51-56.
- Blanco, A. F., E. Salas A. 1997. Micorrizas en la agricultura: Contexto mundial e investigación realizada en Costa Rica. Agronomía Costarricense 21: 55-67.

- Cardona, G., C. P. Peña-Venegas, A. Arcos. 2008. Ocurrencia de hongos formadores de micorriza arbuscular asociados a ají (*Capsicum* sp.) en la Amazonia Colombiana. *Agronomía Colombiana* 26: 459-470.
- Castillo, R. C., L. Sotomayor S., C. Ortiz O., G. Leonelli C., F. Borie B., R. Rubio H. 2009. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on an ecological crop of chili peppers (*Capsicum annuum* L.). *Chilean Journal of Agricultural Research* 69: 79-87.
- Covacevich, F., H. E. Echeverría. 2010. Indicadores para seleccionar inóculos de hongos micorrízicos arbusculares eficientes en suelos moderadamente ácidos. *CI. Suelo Argentina* 28: 9-12.
- Ferrera-Cerrato R., A. Alarcón. 2004. Biotecnología de los de los hongos micorrízicos arbusculares. *In: Memoria Simposio de biofertilización. Río Bravo, Tamaulipas, México, 25 de Noviembre de 2004. pp: 1-9.*
- Galindo-Reyes, M. A., F. Garibaldi M., F. Perdomo R. 2011. La poda de raíz mejora la calidad del chile tipo “Mirasol” criollo. *In: Octava Convención Mundial del Chile. León, Guanajuato, México, 26, 27 y 28 de Mayo del 2011. Consejo Nacional de Productores de Chile. pp: 121-127.*
- Garza-Cano, I., V. Pecina-Quintero, A. Díaz-Franco, H. Williams-Alanís, J. A. Ramírez-De León. 2005. Sorgo cultivado con biofertilizantes, fitohormonas y fósforo inorgánico. *Terra Latinoamericana. Universidad Autónoma Chapingo. México* 23: 581-586.
- González G., M. C., A. Alarcón y R. Ferrera-Cerrato. 2007. Manual de métodos para la investigación y aplicación de hongos micorrízicos arbusculares en laboratorio y campo. *In:*

- G. Fuentes D. y R. Ferrera-Cerrato (ed). Ecología de la raíz. Sociedad Mexicana de Fitopatología. pp 105-150.
- Jaramillo, P. S. P., J. M. Silva B., N. W. Osorio V. 2004. Potencial simbiótico y efectividad de hongos micorrízicos arbusculares de tres suelos sometidos a diferentes usos. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín 57: 1.
- Kapoor, R., D. Sharma, A. K. Bhatnagar. 2008. Arbuscular mycorrhizae in micropropagation systems and their potential applications. Scientia Horticulturae 116: 227-239.
- Mena-Violante, H. G., O. Ocampo-Jiménez, L. D. G. Martínez-Soto, J. González-Castañeda, F. T. Davies and V. Olalde-Portugal. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance fruit growth and quality of chile Ancho (*Capsicum annuum* L. cv San Luis) plants exposed to drought. Mycorrhiza 16: 261–267.
- Ortas, I. 2012. The effect of mycorrhizal fungal inoculation on plant yield, nutrient uptake and inoculation effectiveness under long-term field conditions. Field Crops Research 125: 35–48.
- Ortas, I., N. Sari, Ç. Akpinar and H. Yetisir. 2011. Screening mycorrhiza species for plant growth, P and Zn uptake in pepper seedling grown under greenhouse conditions. Scientia Horticulturae 128: 92–98.
- Rodríguez, Y. Y., B. de la Noval P., F. Fernández M., P. Rodríguez H. 2004. Estudio comparativo del comportamiento de seis cepas de hongos micorrízicos arbusculares en su interacción con el tomate (*Lycopersicon esculentum* M. var. “Amalia”). Ecología aplicada 2: 162-171.

- Rubio, H. R., M. Cepeda P., F. Borie B., A. Contreras N. 1997. Efecto de hongos micorrizógenos arbusculares sobre el crecimiento de algunas hortalizas en almácigo y posterior trasplante. *Agricultura Técnica Chile* 57: 161-168.
- Sieverding, E. 1983. Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesícula-arbuscular en el laboratorio. CIAT, Proyecto Micorriza. Colombia 116 p.
- Salas E., F. Blanco. 2000. Selección de plantas hospederas y efecto del fósforo para la producción de inóculo de hongos formadores de micorrizas arbusculares por el método de cultivo en macetas. *Agronomía Costarricense* 24: 19-28.
- Sensoy, S., S. Demir, O. Turkmen, C. Erdinc and O. Burak S. 2007. Responses of some different pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes to inoculation with two different arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientia Horticulturae* 113: 92–95.
- Serralde O., A. M., M. M. Ramírez G. 2004. Análisis de poblaciones de micorrizas en maíz (*Zea mays*) cultivado en suelos ácidos bajo diferentes tratamientos agronómicos. *Corpoica* 5: 41-40.
- Trejo, D., R. Ferrera-Cerrato, R. García, L. Varela, L. Lara, A. Alarcón. 2011. Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo. *Revista chilena de historia natural* 84: 23-31.
- Usuga, O. C. E., D. A. Castañeda S., A. E. Franco M. 2008. Multiplicación de hongos micorriza arbuscular (H.M.A) y efecto de la micorrización en plantas micropropagadas de banano (Musa AAA cv. Gran Enano)(Musaceae). *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 61: 4279-4290.

Velásquez-Valle, R., L. R. Reveles T., J. Mena C. 2011. Incidencia de virus en parcelas comerciales de chile seco en el norte centro de Mexico. *In: Octava Convención Mundial del Chile*. León, Guanajuato, México, 26, 27 y 28 de Mayo del 2011. Consejo Nacional de Productores de Chile. pp: 75-81.

Yildiz, A. 2010. A native *Glomus* sp. from fields in Aydın province and effects of native and commercial mycorrhizal fungi inoculants on the growth of some vegetables. *Turk J. Biol.* 34: 447-452. doi:10.3906/biy-0901-7

CAPÍTULO II

CEPAS NATIVAS DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES Y FERTILIZACIÓN QUÍMICA EN EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CHILE (*Capsicum annuum* L.) MIRASOL EN INVERNADERO

RESUMEN

Uno de los retos tecnológicos que enfrenta la agricultura es conseguir alternativas que permitan reducir las aplicaciones de fertilizantes químicos, sin afectar los niveles de productividad y rentabilidad de los cultivos. Es posible reducir el uso de fertilizantes de síntesis química haciendo uso de bacterias fijadoras de nitrógeno, hongos micorrízicos y bacterias solubilizadoras de fósforo. En este trabajo se evaluaron cepas nativas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) aisladas de suelo de parcelas de chile Mirasol con manejo tecnificado (TEC) y tradicional (TRA). Las cepas nativas de HMA de los sistemas TEC y TRA se evaluaron en plantas de chile Mirasol en combinación con tres dosis fertilizantes (100, 75 y 50%) con base a la fertilización recomendada (180-90-150). Se establecieron seis tratamientos con 12 repeticiones cada uno. Los tratamientos TEC+75 y TRA+100 fueron los que respondieron más favorablemente en cuanto a la variable rendimiento total por planta evaluado al final del ciclo del cultivo (99 y 101 g, respectivamente). Un comportamiento similar se presentó con los otros parámetros medidos: altura de planta, peso seco (hoja, tallo raíz y total), número de flores, y número de frutos.

Palabras clave: *Capsicum*, micorrizas, suelo, crecimiento de la planta, producción tecnificada y tradicional.

**NATIVE STRAINS OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI AND
CHEMICAL FERTILIZATION ON THE GROWTH OF MIRASOL
PEPPER PLANTS (*Capsicum annuum* L.) UNDER GREENHOUSE
CONDITIONS**

ABSTRACT

Agriculture faces technological challenges to reduce the applications of chemical fertilizers without affecting both crop productivity and profitability. The reduction of chemical fertilization is feasible to achieve by inoculating nitrogen fixing free bacteria, mycorrhizal fungi, and P-solubilizing bacteria. This work evaluated two selected native strains of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) isolated from soil samples collected from pepper crops with either high input (TEC) and traditional management (TRA). The native strains of AMF from TEC and TRA were inoculated in pepper plants (cv. Mirasol) in combination with three fertilization doses (100, 75 and 50%) based on recommended fertilization (180-90-150). Six treatments were set with 12 replicates each. The treatments TEC+75 and TRA+100 resulted in improved responses on the basis of total plant yield (99 y 101 g, respectively) at the end of the crop cycle. Similar responses were obtained for the plant height, dry biomass (leaves, stem, roots, and total), number of flowers, and number of fruits.

Keywords: *Capsicum*; mycorrhizae; soil; plant growth; high input and traditional production.

2.1 INTRODUCCIÓN

Muchas prácticas de la agricultura moderna convencional, caracterizada por el elevado empleo de insumos, además de resultar en altos rendimientos, han traído consigo inestabilidad para los sistemas agrícolas de producción (Blanco y Salas, 1997). Algunos efectos de esto son: rápida destrucción de la materia orgánica del suelo, deterioro de la estructura de la capa superficial arable (Morell *et al.*, 2009); la diversidad de las comunidades de HMA tienden a disminuirse (Barrer, 2009), contaminación del suelo y mantos acuíferos (Villareal *et al.*, 2009) entre otros.

En el país cultivan con el propósito de deshidratación, los chiles Mirasol, Ancho, Pasilla, Puya, Mulato y el de Árbol principalmente, en donde el Mirasol y el Ancho ocupan cerca del 90% de la producción, y el restante 10% los demás chiles (Rincón *et al.*, 2004).

El cultivo de Chile responde positivamente a la aplicación de insumos como los fertilizantes y sus requerimientos pueden ser considerados por encima de otros cultivos hortícolas (Mojarro *et al.*, 2006). Por lo que, uno de los retos tecnológicos que enfrenta la agricultura es conseguir alternativas que permitan reducir las aplicaciones de fertilizantes químicos, sin afectar los niveles de productividad y rentabilidad de los cultivos (Martínez, 2004). Es posible reducir el uso de fertilizantes de síntesis química haciendo uso de bacterias fijadoras de nitrógeno, micorrizas y solubilizadores de fósforo, bajando los costos de producción y aumentando el margen de ganancia para los productores (Rodríguez *et al.*, 2010).

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son importantes en las plantas porque penetran y colonizan las células radicales del hospedante, formando un sistema de transferencia

bidireccional, llevando nutrientes minerales del suelo a la planta (principalmente P, y otros como N, K, Zn, Fe, Cu, Mg, Ca) y compuestos orgánicos de la planta al suelo (Velasco *et al.*, 2001; Kapoor *et al.*, 2008). Por esta razón, la planta, aunque es capaz de crecer de manera independiente, generalmente, tiene mayor desarrollo cuando es colonizada por el HMA; sobre todo, en condiciones de bajos niveles de nutrientes en el suelo (Guzmán-González y Farías-Larios, 2005), es por eso que las micorrizas abren la posibilidad de su uso como complemento de los fertilizantes químicos (Rodríguez *et al.*, 2010).

La distribución y presencia de estos simbioses es afectada en aquellos suelos con diferente grado de fertilidad, diferente manejo agrotecnológico (ejemplo, aplicación de insumos fertilizantes, biocidas o plaguicidas) (Ferrera-Cerrato y Alarcón, 2004). Esto implica diseñar métodos de aislamiento, selección, multiplicación e incorporación adecuados para cada especie o efecto deseado y por otra parte, es necesario determinar las condiciones y técnicas culturales que permitan la manifestación óptima de los efectos (Molina *et al.*, 2005). El uso de prácticas agrícolas apropiadas permite mayor producción de biomasa de la planta, un importante mejoramiento de las condiciones químicas del suelo y superior persistencia de propágulos micorrízicos (Cornejo *et al.*, 2008).

La efectividad de la inoculación dependerá del balance de factores ecofisiológicos en el sistema planta-suelo, lo cual significa que un mismo inóculo puede desencadenar efectos muy variados sobre un cultivo, dependiendo del tipo de manejo agronómico que se realice y de la capacidad que tengan estos microorganismos para mejorar el crecimiento de las plantas (Molina *et al.*, 2005; Yildiz 2010). La confiabilidad de una más alta efectividad de los HMA al parecer depende de su habilidad para funcionar bajo las condiciones del suelo donde serán introducidos. La opción de la efectividad de los HMA basada en las propiedades del suelo podría ser la piedra

angular para el desarrollo del uso efectivo de los inoculantes de HMA en sistemas de producción de plantas (Herrera-Peraza *et al.*, 2010).

La compatibilidad de las especies, capacidad de transporte y efectos prioritarios son todos los procesos que directa o indirectamente afectan la competencia por espacio en raíz o suelo, y por consiguiente son importantes para determinar la persistencia y éxito de taxones fúngicos específicos. Si se logra entender cómo estos procesos operan en las interacciones planta-HMA, se puede optimizar el manejo para estimular el establecimiento de cepas introducidas (Verbruggen *et al.*, 2012).

Los cultivos y las especies de plantas desarrolladas pueden diferir dramáticamente en su habilidad de responder a las diferentes tensiones de los HMA y esto puede complicar las predicciones de hasta qué punto los HMA colonizan las raíces y los efectos resultantes en el crecimiento y desarrollo de la planta (Regvar *et al.*, 2003).

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

SITIO EXPERIMENTAL

El experimento fue establecido en un invernadero tipo túnel en la Unidad Académica de Agronomía (UAA) de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), el cual cuenta con control de la humedad relativa (40 a 80%) y la temperatura máxima de 36 °C. El invernadero se limpió sacando los restos de los cultivos que se tenían ahí para evitar tener una posible fuente hospedera de insectos plaga, posteriormente el piso se lavó con agua y cloro para desinfectar.

SUSTRATO Y CONTENEDORES

Para la preparación del almacigo se utilizó como sustrato peat moss previamente esterilizado a vapor en una olla de presión durante 15 minutos a 120 lb y para el trasplante se empleó suelo que se extrajo de la parcela del sistema de producción tecnificado Cuadro 4, dicho suelo se esterilizó con un fungicida a base de dióxido de hidrógeno al 27%. El almacigo se estableció en una charola de poliestireno (unicel) de 200 cavidades, la cual se esterilizó con cloro (hipoclorito de sodio) comercial al 10%, mientras que el trasplante se hizo en macetas con capacidad de 8 L y que también fueron esterilizadas dióxido de hidrógeno. El fungicida se preparó mezclando 1 mL por cada litro de agua utilizada, la mezcla se adicionó a cada maceta hasta saturar el suelo y después éste se dejó así por una semana para dejar actuar el producto y permitir que el suelo perdiera el exceso de humedad para después poder hacer el trasplante.

Cuadro 4. Características físicas y químicas del suelo utilizado como sustrato para el trasplante.

Parámetros evaluados	Metodología usada	Unidades de medición	Suelo de la Parcela tecnificada
pH	1:2* H ₂ O		6.9
CE	1:5 H ₂ O	dS m ⁻¹	0.05
M.O.	Walkley-Black	%	0.7
N	Kjedahl	%	0.04
P	Olsen	mg kg ⁻¹	60.4
K	NH ₄ Oac 1 N pH 7	cmol kg ⁻¹	1.2
Ca	NH ₄ Oac 1 N pH 7	cmol kg ⁻¹	3.7
Mg	NH ₄ Oac 1 N pH 7	cmol kg ⁻¹	1.6
Na	NH ₄ Oac 1 N pH 7	cmol kg ⁻¹	t
N-NO ₃	KCl 2 N	mg kg ⁻¹	41.4

N-NH ₄	KCl 2 N	mg kg ⁻¹	7.9
Arena			80.6
Limo	Textura Boyoucos	%	8.9
arcilla			10.6
Clasificaci3n textural	-	-	Arenoso franco
B	Azomectine – H	mg kg ⁻¹	0.9
Fe	DTPA	mg kg ⁻¹	4.3
Cu	DTPA	mg kg ⁻¹	0.4
Zn	DTPA	mg kg ⁻¹	0.8
Mn	DTPA	mg kg ⁻¹	8.1

t=trazas

INOCULANTE MICORRÍZICO

Como inoculante se emplearon cepas nativas de HMA las cuales fueron seleccionadas por medio de pruebas de infectividad y efectividad en plantas de chile Mirasol, dichas fuentes de in3culo fueron denominadas TEC y TRA las cuales estuvieron constituidas por esporas, micelio externo y ra3ces colonizadas por HMA (Cuadro 5.). La determinaci3n del n3mero de esporas se realiz3 por el m3todo de tamizado y decantado de Gerdemann y Nicolson (1963, citado por Gonz3lez *et al.*, 2007) en 100 g de inoculante. La inoculaci3n se realiz3 aplicando 15 g de in3culo por planta.

Cuadro 5. Características de los inoculantes que se utilizaron en el experimento

Inoculante	Géneros de hongos micorrízicos arbusculares	Número de esporas en 100 g de suelo seco
TEC	<i>Gigaspora</i> sp-1, <i>Gigaspora</i> sp-2, <i>Gigaspora</i> sp-3, <i>Gigaspora</i> sp-4, <i>Gigaspora</i> sp-5, <i>Gigaspora</i> sp-6, <i>Gigaspora</i> sp-7, <i>Gigaspora</i> sp-8, <i>Gigaspora</i> aff. <i>Margarita</i> , <i>Glomus</i> sp-1, <i>Glomus</i> sp-2, <i>Glomus</i> sp-3, <i>Glomus</i> sp-4, <i>Glomus</i> sp-5, <i>Funneliformis</i> aff. <i>mosseae</i> , <i>Racocetra</i> aff. <i>gregaria</i>	331
TRA	<i>Glomus</i> sp-1, <i>Glomus</i> sp-2, <i>Glomus</i> sp-3, <i>Glomus</i> sp-4, <i>Glomus</i> sp-5, <i>Glomus</i> sp-6, <i>Rhizophagus intraradices</i>	1830

SOLUCIÓN NUTRITIVA

La solución nutritiva empleada para la fertilización mineral fue la solución Steiner (Steiner, 1984) a base de NO_3 , 12 meq L^{-1} ; H_2PO_4 , 1 meq L^{-1} ; SO_4 , 7 meq L^{-1} ; K, 7 meq L^{-1} ; Ca, 9 meq L^{-1} ; Mg, 4 meq L^{-1} ; y una mezcla de micronutrientes con la siguiente concentración de Fe, Mn, Zn, B, Cu y Mo, en mg L^{-1} : 1.5, 0.8, 0.3, 0.4, 0.06 y 0.06, respectivamente. Las fuentes de fertilizantes para los macronutrientes fueron: Ácido fosfórico (H_3PO_4), fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4), nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), nitrato de magnesio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), nitrato de potasio (KNO_3), sulfato de potasio (K_2SO_4), Sulfato de Magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), Fosfonitrato y los micronutrientes con una mezcla comercial. De esta solución nutritiva se derivaron las diferentes dosis para los tratamientos empleados, los cuales se

definieron en concentraciones de 100, 75 y 50%, tomando en cuenta la demanda nutrimental de las plantas de chile mirasol criollo que es de 180-90-150 unidades de N, P, y K, respectivamente. Las cantidades de agua con nutrimentos que se aplicaron fueron desde los 100 mL hasta los 300 mL por día, dependiendo del desarrollo del cultivo.

MATERIAL VEGETAL, SIEMBRA Y TRASPLANTE

La semilla utilizada para la obtención de las plantas fue semilla criolla de chile Mirasol tipo guajillo, este material vegetal ofrece frutos delgados, largos y puntiagudos, que al madurar se tornan de un color rojo a rojo oscuro y su longitud va de 9 a más de 20 cm, en la parte más ancha del fruto alcanza 3 cm. Esta semilla ha sido seleccionada por el productor directamente de la parcela durante aproximadamente 20 años, por lo cual está adaptada a la región productora de chile de la comunidad de Chaparrosa que pertenece al municipio de Villa de Cos, Zacatecas. La siembra se hizo el 01 de Octubre de 2012, depositando una semilla por cada cavidad, después de la siembra se cubrieron las semillas con una ligera capa de una mezcla de peat moss mas vermiculita en una relación 2:1 (v:v) y enseguida la charola se tapó con un plástico negro hasta la germinación la cual ocurrió a los 14 días. Las plántulas durante su desarrollo en el invernadero se regaron con solución de extracto de vermicomposta con una conductividad eléctrica de 1.2 a 1.5 dS m⁻¹. El trasplante se realizó el 27 de noviembre y de manera simultánea al momento de trasplantar se inoculó cada planta usando 15 g de los inóculos TEC y TRA. En cada maceta se hizo una pequeña perforación con un sacabocado y al fondo de la perforación se depositaron los 15 g del inóculo para que las raíces de la plántula de chile estuvieran en contacto directamente con el inóculo, después se dio un riego para evitar un estrés hídrico en las plántulas.

TRATAMIENTOS Y UNIDAD EXPERIMENTAL

Se establecieron seis tratamientos Cuadro 6, los que se derivaron de las combinaciones de los inóculos TEC Y TRA con la fórmula de fertilización recomendada para la producción del chile Mirasol en la región de estudio (Chaparrosa Villa de Cos, Zacatecas). La forma en la que se fertiliza es aplicando 180 unidades de N, 90 de P y 150 de K durante todo el ciclo del cultivo. Para la realización del experimento esta fórmula de fertilización se aplicó en tres concentraciones al 100%, 75% y 50%, de manera conjunta con cada una de las diluciones se utilizaron los inóculos TEC Y TRA para tener al final un total de seis tratamientos. La unidad experimental fue de una planta por maceta lo cual dio un total de 72 plantas o unidades experimentales.

Cuadro 6. Tratamientos para evaluar el efecto de cepas nativas de HMA provenientes de dos sistemas de producción uno tradicional (TRA) y otro tecnificado (TEC) en plantas de chile Mirasol.

INÓCULO DE HMA	FERTILIZACIÓN (%)
TRA	100
TRA	75
TRA	50
TEC	100
TEC	75
TEC	50

VARIABLES EVALUADAS

A partir del trasplante y durante el desarrollo de la planta se consideró efectuar cada dos semanas las mediciones de: Altura de planta (AP), medido del nivel del sustrato al ápice de la rama más alta, para hacer esta medición se utilizó una regla de madera de un metro de longitud; número de flores (NF) contabilizando sólo aquellas que estaban en antesis; número de frutos (NFR) considerando sólo los que tenían una longitud mayor a 2.5 cm; rendimiento total (REN-TOT) al final del ciclo del cultivo y finalmente se concluyó con el experimento tomando el peso seco de tallo (PST); peso seco de raíz (PSR) y peso seco de hojas (PSH), para lo cual estos materiales vegetales fueron secados por separado en una estufa con circulación forzada de aire a 72 °C hasta que el peso fue constante.

DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se establecieron seis tratamientos de estudio los cuales contaron con 12 repeticiones cada uno, estos estuvieron distribuidos en un diseño experimental de bloques completos al azar. A cada variable evaluada se le hizo un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias con el criterio de Tukey al 5% de probabilidad en el error ($p \leq 0.05$). Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa para el análisis estadístico, del inglés, Statistical Analysis Software (SAS), versión 8.1.

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ALTURA DE PLANTA

En la presente investigación se reportan los resultados de la efectividad de dos fuentes de inóculo nativo de HMA al ser combinadas con diferentes dosis de fertilización química en plantas de chile Mirasol. La efectividad de los inóculos TEC y TRA en las plantas de chile Mirasol que crecieron con la combinación de la dosis de fertilización al 75%, fueron las que alcanzaron mayor altura, después le siguieron los tratamientos con ambas fuentes de inóculo pero con la fertilización al 100% y las plantas de menor tamaño se presentaron con TEC-50 y TRA-50. En promedio la altura de las plantas oscilo entre los 28 y 36 cm a las 26-SDT (Figura 5). En el comportamiento de esta variable se presentó un ligero sinergismo de la micorriza con las dosis de fertilización aplicadas sobresaliendo TEC-75 y TRA-75, este tipo de comportamiento también ha sido reportado en otros cultivos en los que han combinado a la micorriza arbuscular con diferentes dosis de fertilización (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2003).

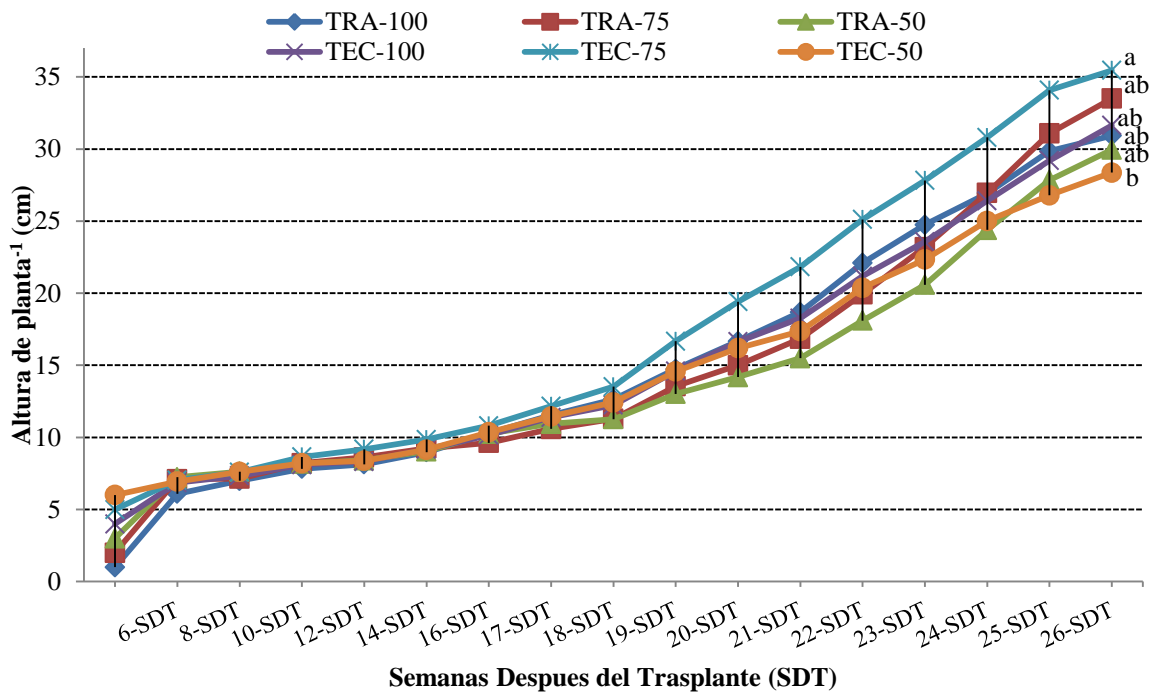


Figura 5. Efecto en la altura de las plantas de chile Mirasol por las fuentes de inóculo micorrízico de suelo tecnificado (TEC) y tradicional (TRA) combinadas con las dosis de fertilización química al 100, 75 y 50%. Promedio de 12 repeticiones.

NÚMERO DE FLORES, FRUTOS Y RENDIMIENTO TOTAL

En términos de aumento de la floración, número de frutos y la mejora del rendimiento, el estudio indicó que la respuesta de crecimiento de las plantas de chile se indujo de manera diferente por las dos fuentes de inóculo de HMA y la fertilización provista. El número de flores se empezó a evaluar a partir de las 16 semanas después del trasplante (SDT), el aumento de la floración se fue dando conforme pasaba el tiempo siendo éste más significativo a las 23 y 24 SDT (Cuadro 7). El tratamiento TEC-75 fue el que produjo la mayor cantidad de flores con

respecto a TRA-50 a las 24 SDT, consecutivamente a las 25 y 26 SDT se presentó la mayor producción de frutos, causando mejor efecto la fuente de inóculo TEC fertilizado al 75% (10.83), la combinación del inóculo TRA-50 provocó la menor generación de frutos (4.83) en la semana 26 después del trasplante (Cuadro 7).

La determinación del rendimiento total se hizo al final del ciclo del cultivo considerando tanto frutos verdes como en podre, la respuesta de las plantas de chile a la inoculación con los HMA nativos al ser combinados con fuentes minerales fertilización indujeron el aumento de la producción, el mejor resultado se tuvo con TRA-100 en seguida TEC-75, 101.19 y 98.6 g, respectivamente en relación a TRA-50 con 55.53 g, el resto de los tratamientos valorados estadísticamente, resultaron ser iguales (Cuadro 7). Douds Jr. y Reider (2003) también encontraron un incremento en el rendimiento de frutos de chile con HMA hasta en un 34% superior al tratamiento sin inocular, incluso en suelos con mucho P. En el mismo sentido de la presente investigación Sreenivasa *et al.* (1993) mostraron incrementos en el rendimiento de plantas de chile con HMA nativos adicionando dosis de fertilización diferentes (0, 25, 50 y 100%) con dos fuentes de fertilizantes fosfóricos (SP y RP), también demostraron que la fertilización con P en su forma soluble se podría utilizar más eficientemente en la presencia de un HMA eficiente y así conseguir un ahorro neto de P-fertilizante. El rendimiento obtenido por el suministro de fosforo al 50 y 100% no presentó diferencias significativas al igual que lo ocurrido en este trabajo. Efectos similares en el rendimiento han sido reportados para otros cultivos (Faramarzi *et al.*, 2012).

Cuadro 7. Efecto en el número de flores a las 23 y 24 semanas después del trasplante (SDT); frutos a las 25 y 26 (SDT) y rendimiento total al final del ciclo del cultivo de chile Mirasol por las fuentes de inóculo micorrízico de suelo tecnificado (TEC) y tradicional (TRA) combinadas con las dosis de fertilización química al 100, 75 y 50%.

MICORRIZA + FERTILIZACIÓN	NÚMERO DE FLORES		NÚMERO DE FRUTOS		REN-TOT
	23-SDT	24-SDT	25-SDT	26-SDT	g Planta ⁻¹ FINAL
TRA-50	1.67 b	2.50 b	2.50 c	4.83 b	55.53 b
TEC-50	2.83 ab	3.00 ab	4.08 abc	5.16 b	75.62 ab
TRA-75	2.83 ab	4.58 ab	3.42 bc	5.67 b	77.81 ab
TEC-75	4.50 a	6.08 a	6.92 ab	10.83 a	98.61 a
TRA-100	3.00 ab	3.50 ab	7.83 a	8.33 ab	101.19 a
TEC-100	2.42 ab	3.92 ab	4.25 ab	7.67 ab	68.22 ab
DMS	2.7	3.4	4.29	5.16	37.72

Cifras seguidas con la misma letra son estadísticamente iguales. (Tukey, $p \leq 0.05$)

REN-TOT= rendimiento total

PESO SECO DE HOJA, TALLO, RAÍZ Y PESO SECO TOTAL

El resultado de la interacción de los HMA con fuentes minerales de fertilización se dio en aumento de la acumulación de biomasa (Figura 6). La variable peso seco de hoja mostró que los tratamientos con la dosis de fertilización al 50% en las plantas inoculadas con ambas fuentes de micorriza produjeron menor respuesta en este parámetro y con el resto de los tratamientos se presentó un incremento significativo. Por otra parte el peso seco tanto de tallo como de raíz no presentó efectos por los tratamientos en ningún caso. En cuanto la biomasa seca total tanto TRA-50 como TEC-50 resultaron ser significativamente menores a TEC-75 y TEC-100. Sreenivasa (1992) determinó el potencial de diferentes inóculos micorrízicos en plantas de chile fertilizadas con la fórmula (150-75-75 de N, P y K, respectivamente) con lo cual encontró que todos los HMA utilizados tuvieron un efecto positivo en el rendimiento con respecto al testigo sin inocular, los rendimientos oscilaron entre los 73 a 135 g por planta entre los tratamientos con micorriza y el testigo sin micorriza con 48 g. Sreenivasa (1992) reportó incrementos de biomasa seca de plantas de chile micorrizadas y fertilizadas con (150-75-75; N-P-K). En un ensayo elaborado por Sreenivasa *et al.* (1993) en el que experimento con HMA y su efecto en plantas de chile fertilizadas al 0, 25, 50 y 100% en base a la dosis de fósforo recomendada, encontraron que el peso seco de biomasa aumentó paulatinamente conforme se elevó la cantidad de P, aunque posteriormente disminuyó con la dosis más alta, tal como sucedió en esta investigación. Resultados con la misma tendencia de lo descrito anteriormente fueron reportados por Douds Jr. (2009).

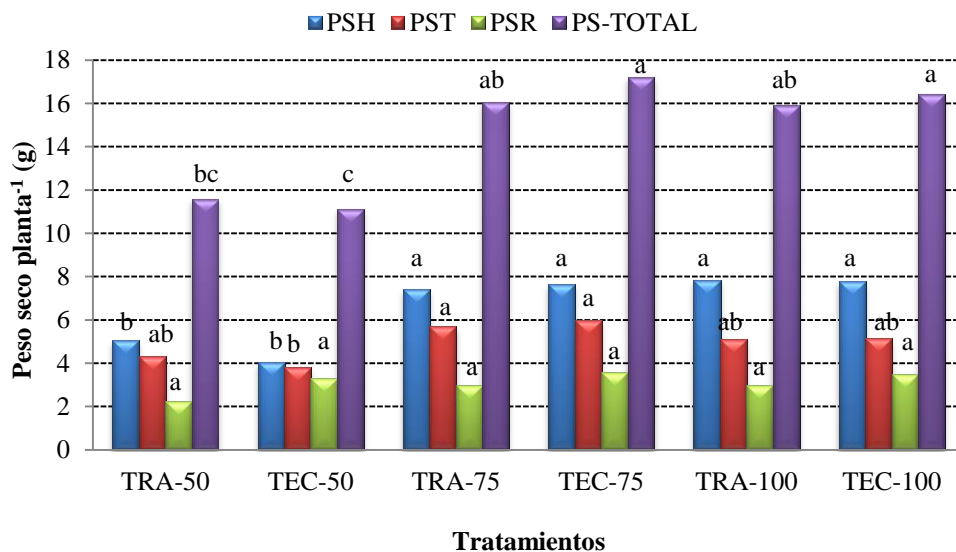


Figura 6. Efecto en el peso seco de hoja, tallo, raíz y en el peso seco total de las plantas de Chile Mirasol por las fuentes de inóculo micorrízico de suelo tecnificado (TEC) y tradicional (TRA) combinadas con las dosis de fertilización química al 100, 75 y 50%, a las 25 semanas después del trasplante. Promedio de 12 repeticiones.

2.4 CONCLUSIONES

Las fuentes de inóculo nativo TEC y TRA afectaron positivamente el crecimiento de las plantas de Chile Mirasol, dando como resultado una mejor producción.

El inóculo nativo TEC combinado con la dosis de fertilización al 75% (135-68-113 de N, P y K, respectivamente) fue la más productiva.

2.5 LITERATURA CITADA

- Alarcón A. y R. Ferrera-Cerrato. 2003. Aplicación de fósforo e inoculación de hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento y estado nutricional de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq. *TERRA Latinoamericana* 21: 91-99.
- Barrer, E. S. 2009. El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. *Facultad de Ciencias Agropecuarias* 7: 123-132.
- Blanco, A. F., E. Salas A. 1997. Micorrizas en la agricultura: Contexto mundial e investigación realizada en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 21: 55-67.
- Cornejo, P., R. Rubio, F. Borie. 2008. Effect of nitrogen source on some rhizospheric properties and persistence of mycorrhizal fungal propagules in an andisol. *Chilean Journal of Agricultural Research* 68: 119-127.
- Douds Jr., D. D. y C. Reider. 2003. Inoculation with Mycorrhizal Fungi Increases the Yield of Green Peppers in a High P Soil. *Biological Agriculture and Horticulture* 21: 91-102.
- Douds Jr., D. D. 2009. Utilization of Inoculum Produced On-Farm for Production of AM Fungus Colonized Pepper and Tomato Seedlings Under Conventional Management. *Biological Agriculture & Horticulture: An International Journal for Sustainable Production Systems* 26: 353-364. DOI: 10.1080/01448765.2009.9755094
- Faramaezi, A., G. Noormohamadi, M. R. Ardakani, F. Darvish and M. B. K. Benam. 2012. Effect of mycorrhiza inoculation and application of different phosphorus fertilizer levels on

yield and yield components of corn (cv. KSC647) in Miyaneh region, Iran. *Journal of food, Agriculture and Environment* 10: 320-322.

Ferrera-Cerrato R., A. Alarcón. 2004. Biotecnología de los de los hongos micorrízicos arbusculares. *In: Memoria Simposio de biofertilización. Río Bravo, Tamaulipas, México, 25 de Noviembre de 2004. pp: 1-9.*

González G., M. C., A. Alarcón y R. Ferrera-Cerrato. 2007. Manual de métodos para la investigación y aplicación de hongos micorrízicos arbusculares en laboratorio y campo. *In: G. Fuentes D. y R. Ferrera-Cerrato (ed). Ecología de la raíz. Sociedad Mexicana de Fitopatología. pp 105-150.*

Guzmán-González, S., Farías-Larios, J. 2005. Biología y regulación molecular de la micorriza arbuscular. *Avances en Investigación Agropecuaria* 9: 17-31.

Herrera-Peraza, R. A., C. Hamel, F. Fernández, R. L. Ferrer, E. Furrázola. 2010. Soil-strain compatibility: the key to effective use of arbuscular mycorrhizal inoculants?. *Mycorrhiza*. DOI 10.1007/s00572-010-0322-6.

Kapoor, R., D. Sharma, A. K. Bhatnagar. 2008. Arbuscular mycorrhizae in micropropagation systems and their potential applications. *Scientia Horticulturae* 116: 227-239.

Martínez, M. J. 2004. respuesta de la biofertilización en el crecimiento y rendimiento de sorgo de grano en Linares, Nuevo León, México. *In: Memoria Simposio de biofertilización. Río Bravo, Tamaulipas, México, 25 de Noviembre de 2004. pp: 43-52.*

- Mojarro, D. F., S. Rubio D., A. Bravo L. 2006. Riego y fertilización en surcos. In: Tecnología de producción de chile seco. A. G. Bravo L., G. Galindo G., M. D. Amador R. (comps.). Zacatecas, México, Diciembre de 2006. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. pp: 77-96.
- Molina L., L. Mhaecha L, M. Medina S., 2005. Importancia del manejo de hongos micorrizógenos en el establecimiento de árboles en sistemas silvopastoriles. Revista colombiana de ciencias pecuarias 18: 162-175.
- Morell, F., A. Hernández, Y. Borgues, F. L. Marentes. 2009. La actividad de los hongos micorrízicos arbusculares en la estructura del suelo. Cultivos tropicales 30: 25-31.
- Regvar, M., K. Vogel-Mikuš and T. Ševerkar. 2003. Effect of amf inoculum from field isolates on the yield of green pepper, parsley, carrot, and tomato. Folia Geobotanica 38: 223-234.
- Rincón, V., F., F. G. Echavarrá Ch., A. F. Rumayor R., J. Mena C., A. G. Bravo L., E. Acosta D., J. L. Gallo D., H. Salinas G., 2004. Cadenas de sistemas agroalimentarios de chile seco, durazno y frijol en el estado de Zacatecas: Una aplicación de la metodología ISNAR. Institución Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Centro Norte. Campo Experimental Zacatecas. Calera, Zacatecas, México.
- Rodríguez, A. E. A., M. M. Bolaños B., J. C. Menjivar F. 2010. Efecto de la fertilización en la nutrición y rendimiento de ají (*Capsicum* spp.) en el Valle del Cauca, Colombia. Acta agronómica 59: 55-64.

- Sreenivasa, M. N. 1992. Selection of an efficient vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus for chilli (*Capsicum annuum* L.). *Scientia Horticulturae* 50: 53-58.
- Sreenivasa, M.N., P.U. Krishnaraj, G.A. Gangadhara and H.M. Manjunathaiah. 1993. Response of chilli (*Capsicum annuum* L.) to the inoculation of an efficient vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *Scientia Horticulturae* 53: 45-52.
- Velasco, V. J., R. Ferrera-Cerrato, J.J. Almaraz S. 2001. Vermicomposta, micorriza arbuscular y *Azospirillum brasilense* en tomate de cascara. *Terra latinoamericana* 19: 241-248.
- Verbruggen, E., M. G. A. van der Heijden, M. C. Rillig and E. T. Kiers. 2012. Mycorrhizal fungal establishment in agricultural soils: factors determining inoculation success. *New Phytologist* 197: 1104–1109.
- Villarreal, R. M., S. Parra T., P. Sánchez P., S. Hernández V., T. Osuna E., J. L. Corrales M., A. D. Armenta B. 2009. Fertirrigación con diferentes formas de nitrógeno en el cultivo de tomate en un suelo arcilloso. *Interciencia* 34: 135-139.
- Yildiz, A. 2010. A native *Glomus* sp. from fields in Aydın province and effects of native and commercial mycorrhizal fungi inoculants on the growth of some vegetables. *Turk J Biol* 34: 447-452. doi:10.3906/biy-0901-7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

1. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación generaron información del comportamiento de cepas nativas de HMA aisladas y seleccionadas de dos sistemas de producción de Chile Mirasol, tecnificado (TEC) y tradicional (TRA) y de la efectividad de estas al ser combinadas con diferentes dosis de fertilización química (100, 75 y 50%).

Los inóculos micorrízicos nativos TEC y TRA provocaron un efecto positivo en las plantas de Chile Mirasol, ya que se presentó un incremento en el número de flores a las 23 y 24 semanas después del trasplante y frutos a las 25 y 26 semanas después del trasplante, a la vez de incrementar el rendimiento. Los tratamientos con los que se lograron los mayores incrementos de rendimiento fueron TEC-75 y TRA-100.

Al utilizar como sustrato para la investigación el suelo del sistema de producción tecnificado se dieron condiciones para el inóculo TEC y para las plantas de Chile Mirasol, lo cual se reflejó en la ausencia de diferencias estadísticas entre las variables evaluadas, por el efecto del inóculo TEC y TRA durante el desarrollo de la investigación. Por lo mencionado anteriormente la hipótesis planteada en la presente investigación es aceptada.

2. RECOMENDACIONES

En futuras investigaciones los inoculantes nativos TEC y TRA utilizados en la presente investigación son una alternativa que debería ser considerada para usarse en otras investigaciones encaminadas a mejorar la producción de Chile Mirasol.

ANEXOS

ESPORAS DEL INÓCULO TECNIFICADO (TEC)



Gigaspora sp-1



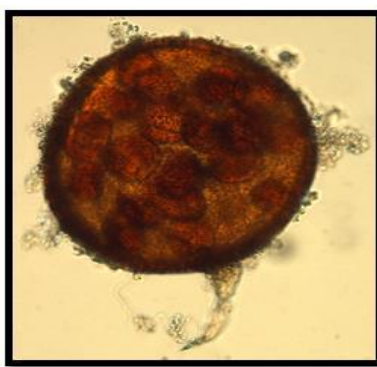
Gigaspora sp-2



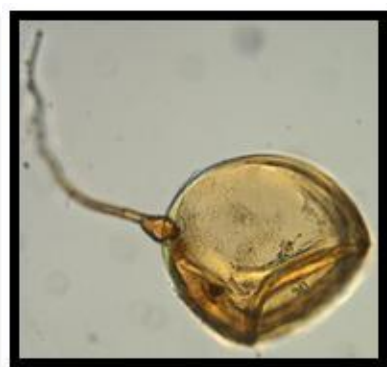
Gigaspora sp-3



Gigaspora sp-4



Gigaspora sp-5



Gigaspora sp-6



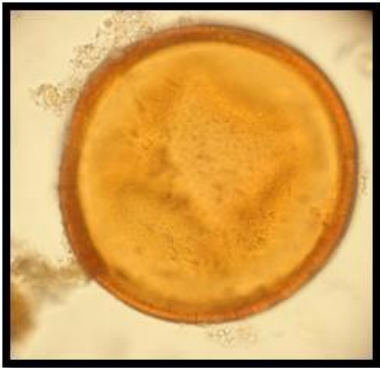
Gigaspora sp-7



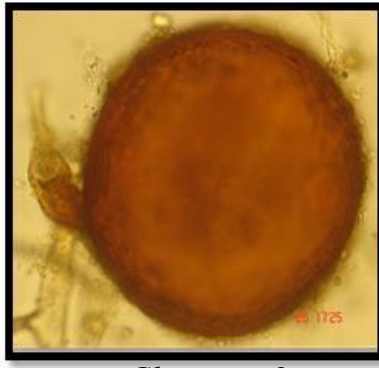
Gigaspora sp-8



Gigaspora aff. *margarita*



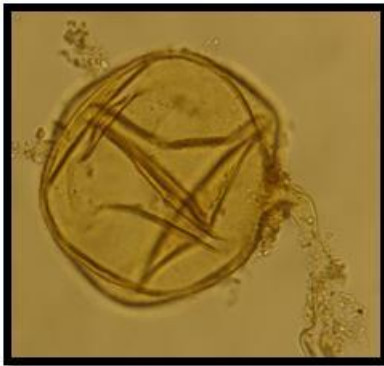
Glomus sp-1



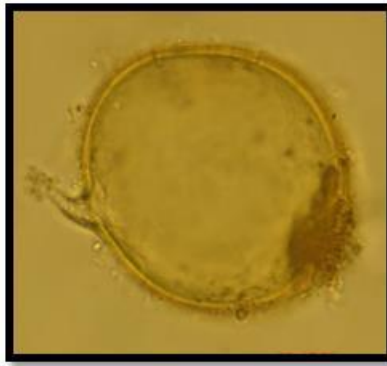
Glomus sp-2



Glomus sp-3



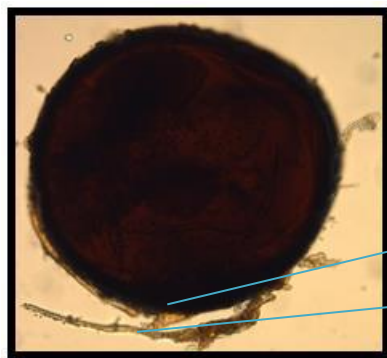
Glomus sp-4



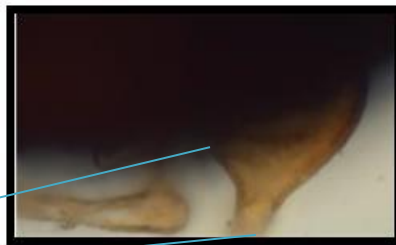
Glomus sp-5



Funneliformis aff. *mosseae*



Racocetra aff. *gregaria*



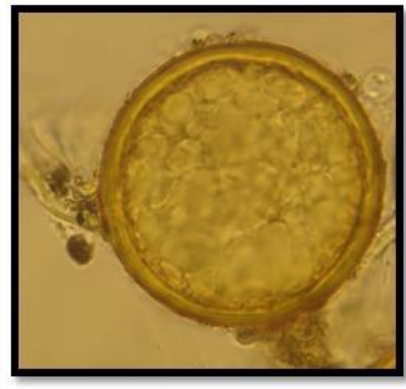
ESPORAS DEL INÓCULO TRADICIONAL (TRA)



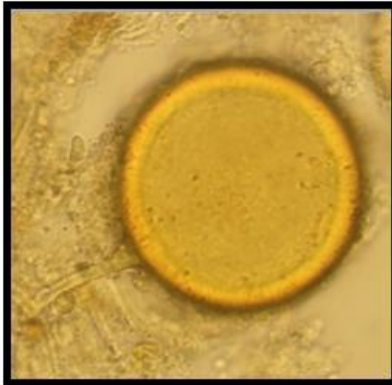
Glomus sp-1



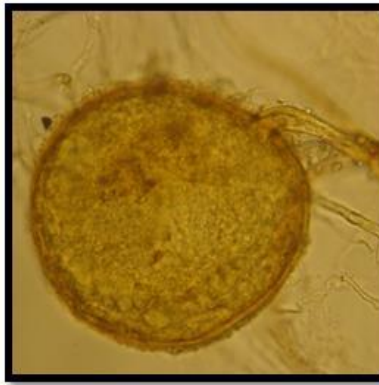
Glomus sp-1



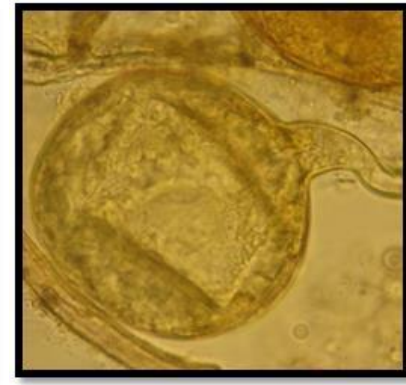
Glomus sp-2



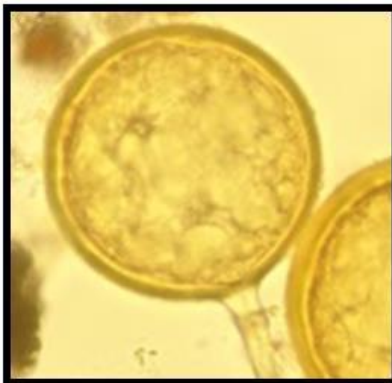
Glomus sp-3



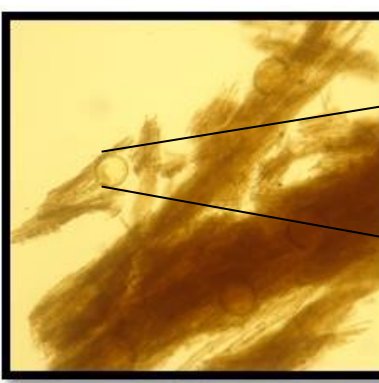
Glomus sp-4



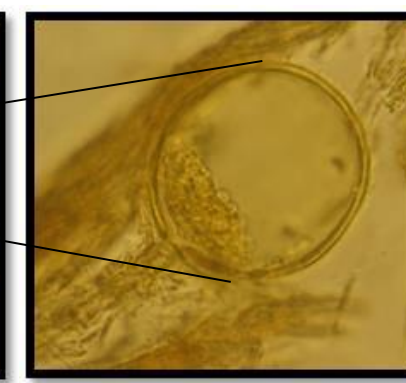
Glomus sp-5



Glomus sp-6



Rhizophagus intraradices



Rhizophagus intraradices