

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y FORESTALES

LABORATORIO DE ECOFISIOLOGÍA VEGETAL

**“Uso de hongos formadores de micorriza arbuscular y
dióxido de silicio en el crecimiento y bioprotección de chile
(*Capsicum annuum* L.), contra *Phytophthora capsici* L.”**

**Tesis que para obtener el grado de
MAESTRA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA**

Presenta:

Yamilet Mora Soto

Director de tesis:

Dr. Luis López Pérez

Codirector:

Dr. Alfredo Reyes Tena

Comité sinodal:

Dr. Raúl Cárdenas Navarro

Dra. Nuria Gómez Dorantes

Dr. Juan Carlos Álvarez Hernández



Tarímbaro, Michoacán. Octubre de 2025

El presente documento de tesis de maestría forma parte de los proyectos:

“Uso de bioefectores en el crecimiento y desarrollo de especies vegetales de interés agrícola del estado de Michoacán”

Financiado por El programa de Investigación de la Coordinación de la investigación Científica (CIC), de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Períodos. 2022, 2023 y 2024.

Líder del proyecto: Dr. Luis López Pérez.

“Micorrizas arbusculares y dióxido de silicio como promotores del crecimiento y bioprotección contra *Phytophthora capsici* L en plantas de chile *Capsicum annuum* L”

Financiado por El programa de Investigación de la Coordinación de la investigación Científica (CIC), de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Períodos. 2025.

Líder del proyecto: Dr. Luis López Pérez.

“Evaluación de microorganismos rizosféricos en el desarrollo y sanidad de plantas de importancia comercial”

Financiado por El programa de Investigación de la Coordinación de la investigación Científica (CIC), de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Períodos. 2024.

Líder del proyecto: Dr. Alfredo Reyes Tena.



“FCCHTI23_ME-4.1.-0011. “Mantenimiento de equipo de laboratorio del Cuerpo Académico consolidado 069-Ecofisiología vegetal, para investigación y docencia”.

Financiado por el programa de Mantenimiento de equipo científico y/o tecnológico (2023), del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI), del estado de Michoacán.

Período. 2023-2024.

Líder del proyecto: Dr. Luis López Pérez

“Mantenimiento de sistemas de purificación de agua para experimentación en ecofisiología vegetal”

Financiado por el programa de Mantenimiento de equipo científico y/o tecnológico (2023), del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI), del estado de Michoacán.

Período. 2023-2024.

Líder del proyecto: Dr. Alfredo Reyes Tena



La investigación se desarrolló en los laboratorios e invernadero del cuerpo académico 069 “Ecofisiología Vegetal” del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, bajo la dirección del Dr. Luis López Pérez y la codirección de la Dr. Alfredo Reyes Tena, así como por la asesoría del Dr. Raúl Cárdenas Navarro, Dr. Juan Carlos Álvarez Hernández y de la Dra. Nuria Gómez Dorantes.

Dedicatoria

A mis padres, mis hermanos, mi novio y amistades.

A todos los lectores, esta tesis es suya.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, al Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias y al programa de Maestría en Producción Agropecuaria, por brindarme el espacio académico y educativo donde me he formado profesionalmente durante estos dos años.

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo brindado a través de la beca de manutención, que me permitió llevar a cabo este proyecto de posgrado. Gracias a esta oportunidad, he podido desarrollar y fortalecer mis capacidades profesionales, académicas y científicas dentro del ámbito agropecuario, particularmente en el área agrícola, siendo así que me permitió retribuir una parte del conocimiento generado a la sociedad.

Le agradezco al Dr. Luis López Pérez por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto de investigación, así como sus observaciones precisas que me guiaron para culminar en tiempo y forma.

Al codirector, Dr. Alfredo Reyes Tena, por su generosidad al compartir su tiempo y conocimientos técnicos, por sus valiosas recomendaciones en la elaboración de este trabajo y por su apoyo para elaborar el artículo de divulgación.

Al Dr. Raúl Cárdenas Navarro, por aceptar formar parte del comité sinodal y por sus enseñanzas en el manejo de software SAS e interpretación en la estadística. Gracias a sus aportaciones y críticas en la escritura y estructura del trabajo de tesis logré avanzar con firmeza con el proyecto.

A la Dra. Nuria Gómez Dorantes, por integrar el comité sinodal, por su tiempo y disposición para ayudarme a identificar y diferenciar las estructuras micorrízicas, y por sus recomendaciones realizadas en los distintos apartados de la tesis.

Al Dr. Juan Carlos Álvarez Hernández, quien, a pesar de la distancia, mantuvo su compromiso como miembro del comité sinodal. Sus recomendaciones y críticas, tanto en los seminarios y en el escrito, fueron clave para moldear el orden y enfoque del trabajo.

A los compañeros y servicios sociales del laboratorio de Ecofisiología Vegetal, por su apoyo y disposición cuando requería de ayuda en los muestreos destructivo.

A mis tutoras la Dra. Pamela y Dra. Mayra, por haber estado pendientes sobre mi desempeño y por guiarme en los aspectos administrativos, académicos, profesionales y personales a lo largo de la maestría.

A mi madre Ermila Soto Salgado, quien, aunque ya no está físicamente, pero cuya voz, enseñanzas, fuerza y amor siguen guiándome en cada paso que doy. Con su memoria viva en mí, culmino este posgrado con gratitud y orgullo.

A mi padre Sergio Mora Corza, que, a pesar de la distancia, me ha dado el valor de perseguir mis sueños y de no rendirme, pues sus palabras me han acompañado en cada momento y afrontando cada proceso con decisión y alegría.

A mis hermanos Sergio Josafat y Yesalia, por impulsarme constantemente y en motivarme a dar siempre lo mejor de mí, gracias a ellos, me han sumergido a estudiar la licenciatura en Educación e Innovación Pedagógica en línea a la par con el posgrado.

A mi novio Arturo Ramírez Ordorica y a su familia, por su compañía incondicional, por su motivación y apoyo en aquellos momentos complicados, y por estar presente ante cualquier circunstancia.

A mi amiga Yadira Alejandra, por nuestras conversaciones y en contactarme con el Dr. Omar y así vincularme con los investigadores donde se generó este proyecto, agradezco por adentrarme y continuar con el camino académico.

A mis colegas y amigas, Irma Leticia y su familia, por abrirme generosamente las puertas de su hogar y brindarme siempre el ánimo necesario para seguir avanzando, claro, su apoyo mutuo y constante, lo valoro profundamente. También a Karla, Adelina y Alma, quienes, a pesar de la distancia, han sido un pilar fundamental en mi camino académico y personal. Estoy agradecida con todas ellas pues a pesar de tantos años de haber culminado la licenciatura, seguimos construyendo nuestra amistad y celebrando juntas cada logro alcanzado.

A las maestras Ma. Rosario y Reyna, por animarme y brindarme la confianza al utilizar el laboratorio de acuática para seguir desarrollándome académicamente, ya fuera para avanzar con el artículo derivado de mi licenciatura o en avanzar con revisión de laminillas para la tesis de maestría.

A mi gatita Chiru, aunque no pueda leer estas palabras, quiero recordarla siempre por su compañía y ronroneos. Estuvo a mi lado todo el tiempo desde el análisis de datos y escritura de la tesis, con su presencia y ternura fue un impulso para continuar y avanzar, por ello, este logro es suyo.

Índice general

Índice de figuras.....	XI
Índice de tablas	XII
I. Resumen general	1
II. General abstract	2
III. Introducción general	3
3.1. Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA).....	5
3.1.1. HMA como agente de control biológico	7
3.2. Elementos benéficos en la agricultura.....	8
3.2.1. Silicio	9
3.2.2. El silicio en la agricultura	10
3.3. Sinergismo entre hongos micorrízicos arbusculares y silicio	11
3.4. Cultivo de <i>Capsicum annuum</i> (chile jalapeño).....	13
3.5. Enfermedades del cultivo de chile	15
3.5.1. <i>Phytophthora capsici</i> L.....	15
IV. Problema de investigación.....	18
V. Justificación	19
VI. Hipótesis.....	20
VII. Objetivo general	21
7.1. Objetivos específicos	21
VIII. Resultados.....	22
8.1. Capítulo I: Susceptibilidad a la colonización micorrízica en cultivares de <i>Capsicum</i> spp.....	22
8.1.1. Resumen.....	22
8.1.2. Chapter I: Susceptibility to mycorrhizal colonization in <i>Capsicum</i> spp. cultivars... ..	23
8.1.3. Abstract	23
8.1.4. Introducción	24
8.1.5. Metodología	26
8.1.5.1. Ubicación del experimento	26
8.1.5.2. Material biológico	26
8.1.5.2.1. Hongo micorrízico	27
8.1.5.3. Sustrato de germinación	27

8.1.5.4.	Establecimiento del experimento.....	27
8.1.5.4.1.	Siembra e inoculación de HMA	28
8.1.5.5.	Variables de respuesta	28
8.1.5.6.	Porcentaje de colonización micorrízica (%PCM).....	28
8.1.5.7.	Análisis estadístico	29
8.1.6.	Resultados y discusión.....	30
8.1.6.1.	Porcentaje de emergencia de los cultivares de <i>Capsicum</i> spp.....	30
8.1.6.2.	Porcentaje de colonización micorrízica de los cultivares de <i>Capsicum</i> spp. .	34
8.1.7.	Conclusiones	41
8.1.8.	Literatura consultada.....	41
8.2.	Capítulo II. Inoculación con hongos micorrízicos arbusculares y distintas concentraciones de dióxido de silicio, sobre el crecimiento de plantas de chile (<i>Capsicum annuum</i> L) cv. jalapeño, en condiciones hidropónicas.....	50
8.2.1.	Resumen.....	50
8.2.2.	Chapter II: Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and different concentrations of silicon dioxide on the growth of chili plants (<i>Capsicum annuum</i> L.) cv. jalapeño under hydroponic conditions	51
8.2.3.	Abstract	51
8.2.4.	Introducción	52
8.2.5.	Metodología	55
8.2.5.1.	Ubicación del experimento	55
8.2.5.2.	Material biológico	55
8.2.5.2.1.	Hongo micorrízico.....	55
8.2.5.3.	Material químico.....	55
8.2.5.4.	Sustratos.....	56
8.2.5.4.1.	Para germinación	56
8.2.5.4.2.	Para trasplante	56
8.2.5.5.	Establecimiento del experimento.....	56
8.2.5.5.1.	Trasplante	57
8.2.5.6.	Tratamientos y diseño experimental.....	57
8.2.5.7.	Condiciones y manejo del experimento.....	58
8.2.5.8.	Muestreos y variables evaluadas	58
8.2.5.9.	Análisis estadístico	59

8.2.6. Resultados	60
8.2.6.1. Efecto de la micorrización, dióxido de silicio y su interacción en variables no destructivas en chile jalapeño	60
8.2.6.2. Efecto de la micorrización, concentraciones de dióxido de silicio y su interacción en las variables destructivas del cultivar jalapeño	68
8.2.6.3. Análisis del porcentaje de colonización micorrízica	74
8.2.7. Discusión	76
8.2.8. Conclusiones	82
8.2.9. Literatura consultada	82
8.3. Capítulo III: Hongos micorrízicos arbusculares y dióxido de silicio como alternativa de control contra <i>Phytophthora capsici</i> en chile jalapeño	90
8.3.1. Resumen	90
8.3.2. Chapter III: Arbuscular mycorrhizal fungi and silicon dioxide as an alternative control against <i>Phytophthora capsici</i> in jalapeño pepper	91
8.3.3. Abstract	91
8.3.4. Introducción	92
8.3.5. Materiales	94
8.3.5.1. Ubicación del experimento	94
8.3.5.2. Plántulas de chile	95
8.3.5.3. Sustratos	95
8.3.5.3.1. Para germinación	95
8.3.5.3.2. Para trasplante	96
8.3.5.4. Hongo micorrízico	96
8.3.5.5. Silicio	96
8.3.5.6. Inóculo de <i>Phytophthora capsici</i>	96
8.3.6. Métodos	97
8.3.6.1. Elección del método de inoculación del patógeno	97
8.3.6.1.1. Método de inoculación con discos de micelio	97
8.3.6.1.2. Método de inoculación con esporangios y zoosporas	98
8.3.6.1.3. Condiciones del experimento	99
8.3.6.2. Evaluación de la severidad de la enfermedad por <i>P. capsici</i> L. en chile jalapeño	100

8.3.6.3. Experimento de control de <i>P. capsici</i> por HMA y SiO₂ en plantas de chile jalapeño	102
8.3.6.3.1. Tratamientos y diseño experimental	102
8.3.6.3.2. Condiciones y manejo del experimento	103
8.3.6.3.3. Inoculación de las plantas de chile con el fitopatógeno	104
8.3.6.3.4. Muestreos y Variables Evaluadas	104
8.3.6.3.5. Variables microbiológicas	104
8.3.6.3.6. Análisis estadístico	105
8.3.7. Resultados y discusión	106
8.3.7.1. Comparación de técnicas de inoculación de <i>P. capsici</i> en chile jalapeño	106
8.3.7.2. Interacción entre HMA y SiO₂ como bioprotectores en chile jalapeño contra <i>P. capsici</i>	109
8.3.8. Conclusión	116
8.3.9. Literatura consultada	118
IX. Discusión general	124
X. Conclusiones generales	127
XI. Perspectivas y recomendaciones	128
XII. Bibliografía complementaria	129
XIII. Anexos	141
Capítulo I. El silicio (Si), un aliado de las plantas	141
El Silicio (Si), un aliado de las plantas	142
Resumen	142
ABSTRACT	142
INTRODUCCIÓN	143
1. Las plantas requieren nutrientes	143
1.1. Nutrientes esenciales para las plantas	144
1.2. Elementos beneficiosos	145
2. Diferencias entre silicio y sílice	146
2.1. ¿De qué forma se almacena el silicio en los organismos?	147
3. Aplicaciones del silicio en la agricultura	149
3.1. Evidencias del silicio en el control de enfermedades en plantas	152
PROSPECTIVA	152

CONCLUSIONES	154
AGRADECIMIENTOS	154
REFERENCIAS	155
13.1. Efecto de la aplicación de hongos micorrízicos arbusculares sobre en la germinación de <i>Capsicum annuum</i> L. y <i>C. chinense</i> Jacq.....	162
13.2. Uso de hongos formadores de micorriza arbuscular y dióxido de silicio en el crecimiento y bioprotección de chile (<i>Capsicum annuum</i> L.), contra <i>Phytophthora capsici</i> L.....	164
13.3. Presencia de hongos endófitos septados oscuros, en raíces micorrizadas de <i>Capsicum</i> sp.: un reporte preliminar.....	166
13.4. Influencia de la simbiosis micorrízica arbuscular y la aplicación de silicio en el crecimiento de tres cultivares de chile en condiciones hidropónicas.....	167
13.5. Reporte de Similitud generado por el sistema Turnitin iThenticate.....	168
13.6. Reporte de Similitud generado por el sistema Turnitin iThenticate con filtro.....	170
13.7. Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial.....	172

Índice de figuras

Figura 1. Porcentaje de emergencia (%EM) de los cultivares jalapeño, serrano y habanero.	30
Figura 2. Porcentaje de colonización micorrízica en cultivares de chile a los 40 dds.	34
Figura 3. Porcentaje de estructuras micorrízicas en los cultivares de <i>Capsicum</i> spp.	36
Figura 4. Estructuras micorrízicas de los cultivares.	38
Figura 5. Observación de hongos endófitos septados en los cultivares de <i>Capsicum</i> spp.	40
Figura 6. Efecto de la micorrización sobre las variables de crecimiento acumulado en plantas de chile jalapeño.	62
Figura 7. Efecto de la concentración de SiO ₂ sobre las variables de crecimiento acumulado en plantas de chile jalapeño.	64
Figura 8. Efecto del factor micorrización en las variables de crecimiento a los 80 ddt.	70
Figura 9. Efecto de la concentración de silicio, en variables de crecimiento a los 80 ddt.	72
Figura 10. Efecto de la interacción por micorrización y concentraciones de SiO ₂ en las variables no destructivas del cultivar jalapeño.	73
Figura 11. Colonización micorrízica en plantas de chile jalapeño, previo y posterior a la aplicación de dióxido de silicio en el agua de riego.	74
Figura 12. Efecto de la concentración de SiO ₂ en la colonización micorrízica a los 80 ddt.	75
Figura 13. Efecto de la interacción micorriza y concentración de SiO ₂ en plantas de chile a los 80 ddt.	76
Figura 14. Técnicas de inoculación de <i>P. capsici</i> en chile jalapeño.	99
Figura 15. Comparación entre la inoculación de <i>P. capsici</i> mediante discos de micelio y zoosporas.	107
Figura 16. Comparación en el tiempo de las dos técnicas de inoculación de <i>P. capsici</i> en chile jalapeño.	108
Figura 17. Efecto de la micorrización sobre el nivel de severidad en plantas de chile en follaje (a) y raíz (b).	110
Figura 18. Efecto de las concentraciones de SiO ₂ sobre el daño en el follaje (a) y radicular (b) de <i>P. capsici</i> en chile jalapeño.	111
Figura 19. Efecto de la interacción de los factores (HMA y SiO ₂) sobre el daño foliar (a) y radicular (b) de <i>P. capsici</i> en chile jalapeño.	114
Anexos	
Figura 1. Representación de los beneficios del silicio en las plantas de interés agrícola	116

Índice de tablas

Tabla 1. Características de siembra de cada cultivar según lo especificado por la empresa.	26
Tabla 2. Especificaciones del método de uso del inoculo de micorriza indicada en la etiqueta del producto comercial.	27
Tabla 3. Diseño experimental, organizado por factores, niveles y tratamientos.	57
Tabla 4. Interacción entre los factores micorrización y las concentraciones de SiO ₂ en las variables agronómicas del cultivar jalapeño.	66
Tabla 5. Efecto de los factores evaluados sobre variables agronómicas evaluado a los 80 ddt.	68
Tabla 6. Porcentaje de daño presentado en plantas de chile irrigadas con 50 y 100 gL ⁻¹ . Flecha roja muestra un anillamiento en la base del tallo.	80
Tabla 7. Diseño experimental los métodos de inoculación de <i>P. capsici</i> en chile jalapeño	97
Tabla 8. Escala de severidad de daño foliar por <i>P. capsici</i> adaptada y modificada para el cultivar jalapeño.	100
Tabla 9. Escala de severidad de daño por <i>P. capsici</i> adaptada y modificada a partir de la escala de Glosier et al., (2008); para el sistema radicular de plantas de chile jalapeño.	101
Tabla 10. Factores y niveles para la evaluación de la severidad de <i>P. capsici</i> en plantas de chile jalapeño micorrizadas y suplementadas con distintas concentraciones de silicio.	102
Tabla 11. Efecto de los factores estudiados y su interacción sobre el crecimiento del chile al final del experimento.	113
Tabla 12. Aspecto de plantas de chile micorrizadas y no micorrizadas suplementadas con distintas concentraciones de dióxido de silicio e infectadas con <i>P. capsici</i> .	116

I. Resumen general

En la presente investigación se evaluó el efecto de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y el dióxido de silicio (SiO₂) como estrategias sostenibles para mejorar el crecimiento vegetal y mitigar el daño ocasionado por *Phytophthora capsici* en el cultivo de chile jalapeño. Primero, se evaluó la susceptibilidad a la colonización con los HMA *Rhizophagus intraradices* y *R. fasciculatum*, en cinco cultivares de *Capsicum* spp., se encontró que cada cultivar presentó variabilidad en la emergencia y en la presencia de estructuras micorrízicas, siendo el cultivar jalapeño el que tuvo una mejor emergencia, colonización micorrícica y la presencia de arbusculos. Posteriormente, bajo condiciones hidropónicas, se analizaron dos momentos de inoculación con HMA (micorriza siembra (MS) y al trasplante (MT), así como la suplementación semanal de tres concentraciones de SiO₂ (0, 50 y 100 gL⁻¹). Los resultados mostraron que micorrizar al trasplante y adicionar el dióxido de silicio a 50 gL⁻¹ se muestra un efecto positivo en las plantas de chile jalapeño mientras que a concentraciones elevadas redujeron el crecimiento vegetal. Después, se realizó un experimento donde se compararon dos métodos de infección por *P. capsici* en las plantas de chile, para ello, se emplearon discos de micelio y zoosporas. Además, se determinó el nivel de daño ocasionado mediante una escala de severidad adaptada y, resultó que ambos métodos son efectivos para causar infección, siendo el método de zoosporas el que se empleó en el experimento posterior. Finalmente, se exploró la interacción de HMA y distintas concentraciones de SiO₂ (0, 25, 50, 75 y 100 gL⁻¹), en plantas de chile jalapeño contra la infección por el fitopatógeno. Los resultados indicaron que plantas con y sin HMA mostraron la misma severidad, mientras que a una concentración intermedia del dióxido de silicio (25 gL⁻¹) se optimiza el crecimiento y las plantas toleran la enfermedad. Se concluyó que el silicio puede actuar como promotor de crecimiento vegetal y agente de control biológico, pero por debajo de 50 gL⁻¹, pues a niveles superiores genera un efecto fitotóxico. En cambio, la micorrización no promovió el crecimiento y el control contra *P. capsici*, de tal manera que en la interacción entre los HMA y el silicio no hubo efectos significativos por lo que es necesario seguir explorando el efecto sinérgico de estos factores bajo otras condiciones.

Palabras clave: sinergismo, silicio, micorrización, chile jalapeño, desarrollo vegetal, fitopatógeno.

II. General abstract

In this research, the effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and silicon dioxide (SiO₂) was evaluated as sustainable strategies to improve plant growth and mitigate damage caused by *Phytophthora capsici* in jalapeño pepper. First, the susceptibility to colonization with the AMF *Rhizophagus intraradices* and *R. fasciculatum* was evaluated in five *Capsicum* spp. cultivars. It was found that each cultivar showed variability in seedling emergence and in the presence of mycorrhizal structures, with the jalapeño cultivar presenting the best emergence, mycorrhizal colonization, and arbuscule formation. Subsequently, under hydroponic conditions, two AMF inoculation times were analyzed at sowing (MS) and at transplanting (MT), as well as weekly supplementation with three SiO₂ concentrations (0, 50, and 100 g L⁻¹). The results showed that inoculation at transplanting and supplementation with silicon dioxide at 50 g L⁻¹ had a positive effect on jalapeño plants, while higher concentrations reduced plant growth. Afterwards, an experiment was conducted comparing two infection methods of *P. capsici* in chili plants using mycelial discs and zoospores. The level of damage was determined using an adapted severity scale, and both methods were effective in causing infection; however, the zoospore method was employed in the subsequent experiment. Finally, the interaction of AMF and different SiO₂ concentrations (0, 25, 50, 75, and 100 g L⁻¹) was explored in jalapeño plants against infection by the phytopathogen. Results indicated that plants with and without AMF exhibited the same severity, whereas at an intermediate concentration of silicon dioxide (25 g L⁻¹), plant growth was optimized, and the plants tolerated the disease. It was concluded that silicon can act as a plant growth promoter and biological control agent, but only below 50 g L⁻¹, since higher levels cause a phytotoxic effect. In contrast, mycorrhization did not promote growth or control against *P. capsici*. Therefore, in the interaction between AMF and silicon, no significant effects were found, highlighting the need to further explore the synergistic effect of these factors under different conditions.

Keywords: synergism, silicon, mycorrhization, jalapeño pepper, plant growth, phytopathogen.

III. Introducción general

El desarrollo óptimo de las plantas depende del equilibrio dinámico entre sus tejidos y la disponibilidad de nutrientes esenciales, sin embargo, cuando ocurre un desbalance en alguno de estos minerales, ya sea por deficiencia o exceso se manifiestan alteraciones morfológicas e incluso son proclives al ataque de fitopatógenos (Bonilla, 2013). Por otra parte, al intensificar y satisfacer la creciente demanda alimentaria, se ha impulsado a la agricultura tecnificada y dependiente del uso de agroquímicos como los fertilizantes, fungicidas, pesticidas, etc., cuyo uso prolongado en los últimos decenios ha conllevado a generar efectos adversos para el suelo, el medio ambiente y la salud humana (ONU, 2022 y Zuma *et al.*, 2023).

Ante esta problemática, han surgido alternativas o estrategias que tengan un bajo impacto a la salud y al medio ambiente, entre estas se destaca el uso de los microorganismos del suelo, tal como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), estos simbiontes proveen agua, nutrientes, optimizan la absorción de los elementos esenciales, promueven el crecimiento vegetal, mitigan el efecto por estreses del tipo biótico y abiótico (Armenta-Bojórquez *et al.*, 2010; Cruz-Cárdenas *et al.*, 2021; Willey, 2016 y Coutiño-Puchuli *et al.*, 2023), además los hace altamente prometedores en el sector agrícola (Devi *et al.*, 2021 y Delgado & Gutiérrez, 2022) ya que mantienen el equilibrio ecológico y adaptativo en los cultivos agrícolas tanto en campo como en invernadero (Altuntas, 2021). No obstante, para tener eficacia en la colonización y potencializar la respuesta micorrízica se deben tener en cuenta múltiples factores como el genotipo del cultivo, el consorcio micorrízico, las condiciones ambientales, las técnicas de inoculación y el tipo de sustrato o suelo que se emplea, ya que cada especie tiende a presentar diferencias y adaptaciones diversas a las condiciones en donde se desarrollan (Declerck *et al.*, 1995; Parke & Kaeppler, 2000; Linderman & Davis, 2004; Sensoy *et al.*, 2007; Lohman *et al.*, 2010; Rodríguez, 2018 y Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022).

De manera complementaria, otra alternativa que se ha empleado para estimular el crecimiento vegetal en los cultivos es el uso de los elementos benéficos, estos pueden actuar como sustitutos de los nutrientes esenciales o en inhibir la absorción y distribución de estos cuando están en exceso (Kathpalia & Bhatla, 2018), entre los que pueden ser es el sodio (Na), cobalto

(Co), selenio (Se), aluminio (Al), cerio (Ce), lantano (La), titanio (Ti), vanadio (V) y silicio (Si) (Bonilla, 2013 y Gómez-Merino *et al.*, 2015). En particular el silicio (Si), suele ser abundante en la corteza terrestre (Chang & Overby, 2019), su aplicación se ha reportado en la literatura en forma de silicatos como K₂SiO₃, Na₂SiO₃, MgSiO₃ o incluso en ácido silícico (H₂SiO₄), dióxido de silicio (SiO₂) y la tierra de diatomeas (Rodrigues *et al.*, 2015 y Roca, 2020). Este elemento brinda diversos efectos favorecedores en la fisiología y metabolismo de la planta, ya que el Si promueve el crecimiento vegetal, protege y proporciona mayor rigidez y elasticidad en las células vegetales, favorece a la resistencia ante factores del tipo biótico y abiótico, por ello, es un elemento clave en la protección en los cultivos agrícolas, de tal modo que su aplicación se ha efectuado en cultivos de importancia económica como la caña de azúcar, avena, sorgo, trigo, maíz, frijol, cebolla, zanahoria, lechuga, col, sandía, melón, pepino, guisantes, lenteja, soya, aguacate, algodón, banana, cacao, fresa, tomate, pimienta, café, uva, así como de árboles frutales y ornamentales (Ma *et al.*, 2001; Kaya *et al.*, 2006; SEPHU, 2009; French *et al.*, 2010 y Castellanos *et al.*, 2015), por lo que se ha considerado como una estrategia ecológica y sostenible (Deb & Dutta, 2022).

En este mismo sentido, comprender la ecología de las plantas, sus simbioses y organismos antagonistas ha permitido explorar estrategias innovadoras y sostenibles de producción (Frew *et al.*, 2017), como es la incorporación sinérgica de los hongos micorrízicos arbusculares y la aplicación de silicio, ya que se perfilan como herramientas sostenibles que no solo optimizan la absorción nutrimental, sino que también potencian la tolerancia vegetal frente a factores de estrés (Das *et al.*, 2021 y Bijalwan *et al.*, 2021), pues influyen en la activación de mecanismos de defensa contra el ataque de fitopatógenos (Álvarez *et al.*, 2023).

La presente investigación se centró en el cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.), el cual, tiene importancia económica en el mundo y en México debido a su uso culinario y prehispánico, además, de que esta hortaliza cuenta con un alto valor nutricional y llega a presentar diferentes propiedades medicinales para la salud humana (Khair *et al.*, 2018 y Hernández-Pérez *et al.*, 2020). Sin embargo, dicho cultivo es amenazado por el aumento y variabilidad de las condiciones ambientales afectando el rendimiento y producción (Zhang *et al.*, 2024), volviéndose susceptible a diversas enfermedades causadas por hongos, bacterias, nematodos, virus y por *Phytophthora capsici* Leonian, un oomycete que causa la

principal enfermedad del cultivo de chile conocida coloquialmente como “marchitez del chile”, la cual, provoca la pérdida de turgencia en las hojas, pudre las raíces, tallos, hojas y frutos del cultivo por lo que representa uno de los mayores retos en el manejo sanitario en el campo (Moreira-Morrillo *et al.*, 2023 y Sonogo *et al.*, 2023). Este fitopatógeno se encuentra reportado a nivel mundial, en México, así como también en Michoacán, por lo que las oosporas son la forma resistente y la manera de permanecer en el suelo por largos periodos de tiempo, lo que conlleva a infectar a los campos agrícolas, siendo así que, los productores recurren al uso de productos químicos, pero estos a su vez conllevan a generar contaminación del agua y a la pérdida de la fertilidad del suelo (INIFAP, 2008 y Michalk *et al.*, 2019).

Por lo anterior, en este trabajo se evaluó la susceptibilidad y eficacia de la inoculación con HMA y la adición de concentraciones de entre 0 hasta 100 gL⁻¹ de SiO₂ en plantas de chile jalapeño, ambas como estrategias sostenibles para mejorar el crecimiento vegetal y mitigar el daño frente al fitopatógeno *P. capsici*. En esta investigación se buscó contribuir con el desarrollo de estrategias agrícolas sustentables y adaptadas a condiciones hidropónicas con el fin de disminuir el uso de químicos en la producción agrícola. Sin embargo, los hallazgos de esta investigación destacan el uso del dióxido de silicio en concentraciones inferiores en el cultivar jalapeño, aunque la sinergia esperada con los HMA y el SiO₂ fueron dependientes a múltiples factores y se requiere de más investigación al respecto.

3.1. Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA)

La palabra micorriza, derivado del griego *myces* = hongo y *rhiza* = raíz, este término fue acuñado en 1877 por el patólogo forestal alemán Frank y describe la interacción ecológica que existe entre algunos hongos y raíces de las plantas. Estas asociaciones surgieron hace millones de años y conllevó a que las plantas colonizaran el medio terrestre, debido a que en esta interacción el hongo obtiene carbohidratos y un microhábitat para completar su ciclo de vida y de igual manera la planta obtiene nutrientes, minerales y agua. Las micorrizas presentan distintas variantes según las características estructurales tanto del hongo o la planta involucrada (Camargo-Ricalde *et al.*, 2012).

En este aspecto, están los hongos ectomicorrízicos (HEM), estos hongos pueden tener cierto grado de penetración intracelular y tener hifas que formen una estructura llamada red de Harting, la cual transfiere nutrientes a la planta, dentro de este grupo se hallan las asociaciones del tipo arbutoide y monotropoide. De manera similar, la endomicorriza orquideoide, esta interactúa con las orquídeas y dependen íntegramente del hongo para germinar y crecer; mientras que la endomicorriza ericoide es característica de la familia Ericaceae. Por otra parte, están los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), son pertenecientes al Phylum Glomeromycota, se caracterizan por ser biótrosos obligados y su ciclo presenta dos fases: la intraradical y extraradical. Estas hifas captan, acumulan y controlan el flujo de nutrientes del suelo y obtienen carbohidratos para la planta hospedante, además este tipo de micorriza tiene impacto en el desarrollo y aumento de producción en la agricultura (Andrade-Torres, 2010). Existen diversos reportes sobre el conocimiento de la micorriza arbuscular que son abundantes en la rizósfera y permiten la captación de fósforo, así como la de tolerar las situaciones de estrés, estabilizar los agregados del suelo y captar los metales pesados (Guerra-Sierra, 2008); lo que a las especies vegetales les permite favorecer el crecimiento radicular, la actividad fotosintética, el contenido de clorofila y asimilación de CO₂ (Balog *et al.*, 2017), para aumentar su supervivencia, crecimiento, reproducción y establecimiento, ya sea en condiciones normales o al estrés ambiental (Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022).

Algunas evidencias de la colonización de los HMA en las raíces de las plantas es que llegan a cambiar aspectos fisiológicos de la planta como es la producción de fitohormonas, disminuir la permeabilidad de las membranas celulares, favorecer la actividad con otros microorganismos benéficos y en producir exudados en la raíz para reducir la severidad de hongos y bacterias patógenas (Reyes, 2011). Otro ejemplo aplicado de los HMA es que al inocular la especie *Rhizophagus intraradices* en plantas de tomate híbridas (cv. El Cid) (*Lycopersicon esculentum*; tipo Saladette) bajo condiciones de casa sombra y controladas en el riego y fertilización, obtuvieron una colonización micorrízica del 58%, así como también incrementos positivos de un 12 % en la altura y clorofila, e incremento de producción de frutos en un 30%. Esto demuestra el potencial de los HMA como herramienta biotecnológica útil para la producción hortícola (Alvarado *et al.*, 2014), debido a que los HMA mejoran el crecimiento y rendimiento productivo de los cultivos (Reyes-Tena *et al.*, 2015) y

especialmente al inocular productos a base de esporas y/o consorcios (Carballar-Hernández *et al.*, 2018).

3.1.1. HMA como agente de control biológico

Las interacciones microbianas pueden ser beneficiosas, perjudiciales o neutrales y pueden influir en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Ibarra, 2015). Los hongos del suelo desempeñan un papel crucial en el ambiente e influyen en las actividades biológicas de las plantas ya sea como simbioses, patógenos o degradadores de la materia orgánica, por tal motivo, comprender el papel central de estos microorganismos en el crecimiento y en las enfermedades de las plantas es esencial (Caamal-Chan *et al.*, 2024). Existe evidencia de que el uso de los HMA como agentes de control biológico de patógenos de raíz en especies hortícolas y ornamentales, tal como la utilización de *Glomus* sp. y *G. aggregatum* reducen la pudrición de raíces de gladiola en campos contaminados por *Fusarium oxysporum* f. sp. *gladioli* (Khalil *et al.*, 2001). De igual forma, se ha demostrado que son efectivos contra nematodos como *Meloidogyne* spp., ya que los HMA interfieren en la capacidad reproductiva de los nematodos y promueven el crecimiento de los cultivos hortícolas a pesar de la carga parasitaria, lo cual les confiere la capacidad equivalente a los nematicidas químicos (Cristóbal-Alejo *et al.*, 2021); o en bulbos de agave que son atacados por *F. oxysporum* y aunque no existe un efecto protector en la parte foliar pero si una respuesta positiva en el sistema radicular del agave al inocular HMA, pues ejercen un biocontrol localizado en la raíz (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2023).

En este mismo sentido, existe evidencia sobre el uso de HMA y la aplicación combinada con otros microorganismos como *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp., ya sea de manera individual o en mezcla, las cuales aportan beneficios importantes para las plantas como es la estimulación del crecimiento y la supresión de enfermedades (Cano, 2011), tal como reporta Acevedo, (2020) que el hongo micorrízico *R. intraradices*, *Trichoderma harziaum* y *T. asperellum* ejercen un efecto inhibitor sobre *Pythium myriotylum*, sin embargo, no suprimen completamente los efectos de la enfermedad. Así pues, también se ha reportado que la coinoculación de HMA y las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (RPCV)

promueven la emergencia en 23 cultivares de Chile y reducen la capacidad de ataque por *Phytophthora capsici* (Leos-Escobedo *et al.*, 2022).

La interacción sinérgica entre hongos micorrízicos arbusculares y otros microorganismos benéficos, representa una estrategia que promueve y fortalece la defensa vegetal frente a diversos estreses particularmente del tipo biótico y en las que se activan diferentes señalizaciones, se estimula la competencia y se mejora el sistema radicular. Sin embargo, considerar el empleo de los elementos benéficos como el silicio, se podrían ampliar los mecanismos de resistencia a patógenos y la inducción de enzimas de resistencia como quitinasas, glucanasas, peroxidasas, etc.

3.2.Elementos benéficos en la agricultura

Al optimizar la nutrición mineral se permite tener un mayor vigor vegetal y se reduce la severidad de las enfermedades en las plantas, ya que considerar la aplicación y cantidad requerida de estos elementos durante los diferentes estados de crecimiento, se mejora la eficacia de la absorción de la planta, así como también se evita en modificar el ambiente químico y biológico que influye directamente en la disponibilidad de los nutrientes presentes en el suelo (Huber, 1997). Ante esto se han identificado los elementos benéficos que sin ser esenciales para la fisiología de la planta pueden mejorar el crecimiento, la respuesta al estímulo ante los ambientes y al aprovechamiento de nutrimentos para la planta, ya que pueden actuar como sustitutos de los nutrientes esenciales o inhibir la absorción y distribución cuando están en exceso dichos elementos, entre los que se destacan es el sodio (Na), cobalto (Co), selenio (Se), aluminio (Al), cerio (Ce), lantano (La), titanio (Ti), vanadio (V) y silicio (Si) (Bonilla, 2013; Gómez-Merino *et al.*, 2015 y Kathpalia & Bhatla, 2018), como indican Cuacua-Temiz *et al.*, (2017) donde el uso de cuatro elementos benéficos como Al, Co, Se y Si, en especies ornamentales como la *Heliconia psittacorum* L. F. X *H. spathocicinata* cv. Golden Torch Adrian, estos elementos modulan las concentraciones de nutrientes esenciales a lo largo de las diferentes etapas fenológicas de la planta, lo cual afecta tanto el crecimiento y la vida de florero.

3.2.1. Silicio

Existen minerales que han sido considerados como beneficiosos para las plantas pero no son esenciales, entre ellos se encuentra el silicio, el cual ha reportado Peñaloza (2021), su aplicación del Si en *S. lycopersicum* y obtuvo que el Si redujo la incidencia de plagas y enfermedades, indicando que las plantas con Si, mostraron un mayor crecimiento y promovieron la floración, esto comprueba que la aplicación de dióxido de silicio tiene un efecto en el balance nutricional pero también el uso constante puede ocasionar fitotoxicidad leve generando retraso en crecimiento.

El silicio (Si) es extremadamente común en la naturaleza, representa el 27.2% de los elementos totales y es el segundo más abundante en la corteza terrestre. Su simbología es (Si), es un metaloide, además presenta características entre los no metales y los metales, no forma compuestos iónicos, su estado de oxidación es +4, su forma más estable es el dióxido de silicio (SiO₂) pero se encuentra comúnmente en arenas, arcillas y silicatos (Chang & Goldsby, 2019). De igual manera, el silicio es un microelemento esencial en los animales, pues, es parte del exoesqueleto de organismos marinos y forma la parte estructural de las paredes celulares de las diatomeas y tejidos conectivos de los animales (Breydo, 2013 y Britannica, 2023). Asimismo, las plantas llegan a absorberlo, como ácido monosilícico u ortosilícico (H₄SiO₄), el cual, es tomado por las raíces mediante el transporte pasivo o activo, y por vía de transpiración es transportado por el sistema vascular para después ser precipitado y formar dentro de la planta unas estructuras llamadas fitolitos, estas formas microscópicas se infiltran en cada célula y forman un tejido silicificado. Este proceso ocurre por la biomineralización de las células vasculares epidérmicas y está relacionado a la distribución de fitolitos y a la transpiración, por lo que no todas las plantas llegan acumular silicio en sus células, puesto que dependen de cada taxón o grupo de plantas (Strömberg *et al.*, 2016). Esta variabilidad morfofisiológica en la capacidad de absorción y distribución del silicio condiciona su papel como inductor de resistencia sistémica, como lo demuestran Delgado-Morato y Bermúdez-Cardona, (2021), quienes evaluaron su efecto junto con el antagonismo de *T. viridae* para el manejo de la marchitez vascular causada por *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* en tomate híbrido Santa Clara (*S. lycopersicum* L.). En este estudio, el silicio mostró una reducción del 47% en la severidad foliar del fitopatógeno y un aumento en la enzima Polifenoloxidasas (PPO), lo

que sugieren una activación de mecanismos bioquímicos de defensa incluso en plantas que no presentan biosilicificación.

3.2.2. El silicio en la agricultura

Existen investigaciones del silicio enfocados en la agricultura, Onofre (2019), reportó la importancia de este elemento y los efectos del silicio en la agricultura, ya que presenta múltiples funciones tanto en el suelo, planta y ambiente. En el desarrollo de los cultivos, desde la siembra y la cosecha, cumple con la función de desbloqueador de nutrientes en el suelo, favorece la producción de fitoalexinas, inhibe la transpiración excesiva de agua, refuerza las paredes celulares de las hojas y evita la infección de hongos fitopatógenos. Al mismo tiempo, el uso del silicio como un elemento multifuncional ayuda a incrementar la productividad y mejorar la calidad de productos agrícolas, tal como reportan Villalón-Mendoza *et al.*, (2018), quienes emplearon el SiO₂ en plantas de chile piquín (*C. annuum* L. var. *Glabriusculum*), producidas en vivero y señalan que este compuesto tuvo un efecto positivo sobre el crecimiento y calidad de las plantas. De la misma manera, Victoria (2022) evaluó el efecto de tres dosis de silicio (10 g, 12 g, 14 g) sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo de pimienta bajo condiciones controladas de invernadero. Sus resultados señalaron que la dosis de 10 g fue la más efectiva, ya que a partir de la cuarta semana se observó un incremento significativo en las características morfológicas como en la altura y a los 91 días aumentó el número y peso de frutos en cada planta. Sin embargo, este trabajo concluye que las dosis superiores a 10 g generan una reducción en el desarrollo vegetativo del pimienta, lo que indica que existe un umbral óptimo de aplicación para maximizar el rendimiento sin afectar negativamente el crecimiento del cultivo.

Por otra parte, el silicio también puede ser usado contra fitopatógenos tal como lo indica Varas (2021), quien evaluó la aplicación de silicio granular en distintas dosis para el control de *P. capsici* en el cultivo de pimienta híbrido Martha (*C. annuum*), en el cual aplicó en 15, 30 y 45 días después del trasplante a nivel edáfico con las concentraciones de 200, 300, 400, 500 y 600 kg/ha y un (testigo sin aplicación de Si pero con empleo de NPK). Reporta que la dosis de 500 kg/ha de silicio reduce la presencia de *P. capsici* en el cultivo de pimienta tanto

a nivel foliar y en frutos, ya que añade que los métodos complementarios para estimar la sintomatología como la escala visual y el programa de Leaf Doctor utilizadas en su estudio no presenta diferencias estadísticas entre ambos métodos, por lo que son efectivos y concluye que la aplicación del silicio es positivo contra el fitopatógeno pero se debe considerar valorar la rentabilidad y viabilidad económica.

3.3.Sinergismo entre hongos micorrízicos arbusculares y silicio

El uso combinado de herramientas sostenibles como la fertilización con Si y HMA, podría ser una estrategia prometedora ante factores de estrés abiótico y biótico, sin embargo, los mecanismos fisiológicos, bioquímicos y moleculares de esta acción sinérgica, suelen ser desconocidos (Vega *et al.*, 2023).

Existen reportes en donde al emplear Si en combinación con los HMA, ambos aportan beneficios a la planta, tal como reportaron Garg y Bhandari (2015), quienes evaluaron el efecto individual y combinado del Si (silicato de potasio) y del HMA *Funneliformis mosseae* sobre dos genotipos de garbanzo (*Cicer arietinum*): HC3 (tolerante a la sal) y CSG9505 (sensible a la sal), bajo condiciones de estrés por salinidad. Los tratamientos suplementados con Si y *F. mosseae* mostraron beneficios significativos en ambos genotipos, como una mayor absorción de silicio en raíces y hojas, además contrarrestaron los efectos negativos de la salinidad, mejoraron el crecimiento y la absorción de nutrientes. Otro efecto positivo fue la inducción de la floración, cuajado de las vainas y el desarrollo de las semillas, hubo reducción al daño del pigmento de clorofila y aumentó la actividad de RUBISCO bajo condiciones de salinidad. Concluyen que los efectos benéficos observados tanto en condiciones de aplicación individual y combinadas fueron mejores respecto a la ausencia de aplicación.

De igual manera, Oye *et al.*, (2016) investigaron el papel de los HMA, específicamente *R. irregularis*, en la absorción de silicio (Si) y fósforo (P) en plántulas de banana (*Musa acuminata*) premicorrizadas, como estrategia para fortalecer la resistencia vegetal ante plagas y enfermedades. Realizaron cuatro tratamientos con presencia/ausencia de HMA y Si, después de seis semanas de crecimiento en macetas, en efecto evaluaron el peso seco de la raíz, los brotes, pseudotallos y hojas, así como también el análisis de fósforo (P), silicio (Si)

y la colonización de los HMA en raíces. Los autores demuestran que las plántulas precolonizadas con HMA, tanto con la presencia/ausencia de Si agregado al sustrato presentaron mayor acumulación de Si en pseudotallos, hojas y raíces, así como un incremento significativo en el contenido de P. Después del experimento, la colonización de HMA se mantuvo alta y no observaron diferencias, finalmente reportaron que el aumento de arbuscúlos pudo promover la transferencia de Si a las células vegetales, así como del fósforo (P). Concluyeron que esta interacción puede representar una nueva vía para explorar la resistencia del banano ante plagas y enfermedades, aunque exista poca información sobre el papel de los HMA en la absorción de Si.

Otro trabajo sobre el efecto combinado de HMA y Si fue el de Frew *et al.*, (2017) quienes investigaron el efecto combinado de inóculos nativos y comerciales de HMA y en suelos con distintas concentraciones de silicio, con el objetivo de promover la resistencia en el sistema radicular de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) frente al ataque por larvas de *Dermolepida albohirtum*. Los resultados mostraron que la presencia de HMA y niveles elevados de Si en el suelo proporcionaron beneficios al reducir la alimentación de los insectos e incremento la fotosíntesis en las plantas. Concluyeron que los mecanismos involucrados en esta relación aun no son claros y se requiere de más investigaciones, por lo que se destaca la posibilidad de explorar estas interacciones para su aplicación en estrategias de manejo de plagas en el futuro.

Del mismo modo, Garg y Kashyap, (2017), evaluaron el efecto combinado del Si y *R. irregularis* sobre el crecimiento, la absorción y el rendimiento bajo estrés de arseniato (V) y arsenito (III) en dos genotipos de guandú o frijol chícharo (*Cajanus cajan*). Indicaron que la aplicación combinada de Si y *R. irregularis* mejoró el estado hídrico en las hojas, los pigmentos de clorofila, la biomasa tanto en raíces y brotes, así como la productividad y reducción de los impactos negativos del arsénico (As). Concluyeron que en las plantas tratadas con la combinación de Si+HMA existió una correlación positiva entre la micorrización y la absorción de Si, inclusive detuvo los efectos tóxicos de As V y As III hasta la producción de semillas en el genotipo tolerante a metales, por lo que seleccionar un genotipo con mayor capacidad de colonización por los HMA muestra mayor efectividad de

la absorción de Si en la planta, lo que refuerza su potencial como estrategia de biofortificación sostenible.

Diversos estudios han documentado la aplicación conjunta de los HMA y el Si ante condiciones estresantes como salinidad, toxicidad por metales pesados y sequías, las cuales contribuyen a la seguridad alimentaria mundial, sin embargo, como indica Vega *et al.*, (2023) esta aplicación conjunta de Si+HMA muestran beneficios a las plantas que son cultivadas en condiciones estresantes, sin embargo, los mecanismos que intervienen en esta interacción sinérgica en particular siguen siendo desconocidos.

En este mismo sentido, existe poca evidencia sobre la integración estratégica de HMA y Si ante el estrés biótico ya sea para reducir el impacto de plagas, así como de fitopatógenos, por lo que presentar esta herramienta innovadora ante el fortalecimiento y resistencia en hortalizas de importancia económica como es la especie de *C. annuum* frente a *P. capsici*, es necesario implementar esta alternativa sostenible para abrir nuevas posibilidades en el control y manejo de las enfermedades.

3.4.Cultivo de *Capsicum annuum* (chile jalapeño)

La clasificación taxonómica del género *Capsicum* L., perteneciente a la familia de las Solanaceae Juss, e incluye especies de interés económico como el jitomate, la papa, berenjena, tomate y petunias, etc. (Hernández-Pérez *et al.*, 2020 y Tropicos, 2025). Esta hortaliza se le puede conocer comúnmente como: chile, pimienta, ají, etc., tiene importancia cultural, agronómica, nutricional y económica en México, además es popular en el mundo, ya que es utilizado como condimento de alimentos (Aguirre-Mancilla *et al.*, 2017). Se reconocen cinco especies domesticadas: *C. annuum*, *C. chinense*, *C. frutescens*, *C. pubescens* y *C. baccatum* (INTAGRI, 2020), siendo la especie *C. annuum* la más cultivada a nivel mundial y con más variedades y tipos morfológicos que tienen importancia económica y de producción en los que destacan el pimienta morrón, jalapeño, serrano, anaheim, guajillo y ancho (SNICS, 2017).

Su centro de origen se ubica en las regiones tropicales y subtropicales del continente americano, siendo México considerado por ser el centro de origen y domesticación de la especie *C. annuum* L., ya que cuenta con una gran variedad de formas, colores, tamaños de frutos y la existencia de poblaciones silvestres que se han estudiado con el objetivo de preservar y obtener información sobre dicha especie (Barrantes, 2010; Aguirre-Mancilla *et al.*, 2017).

La producción a nivel mundial de *C. annuum* en el año 2020 y 2022, posicionó a China como el principal productor mundial, con una producción anual de 16 650 855 toneladas, mientras que México ocupó el segundo y cuarto lugar respectivamente, compitiendo con países como Turquía, Indonesia, España y Egipto, (FAO, 2023). En México se ha consolidado como uno de los principales exportadores de chile, gracias a su amplia diversidad genética, capacidad productiva y adopción de tecnologías en sanidad vegetal y sistemas de riego como por gravedad, bombeo, goteo y temporal. No obstante, el país enfrenta el reto de fortalecer, invertir y atender en el mantenimiento y mejoramiento del estatus fitosanitario, así como también a los obstáculos técnicos al comercio (SIAP, s.f.).

Asimismo, en el ámbito nacional durante el año 2019 se cultivaron aproximadamente 135 488.2 hectáreas y 1 981 390 toneladas de chile. Además, los estados con un alto registro de producción destacan Chihuahua (562 mil toneladas), Sinaloa (556 mil) y Zacatecas (348 mil) (SADER, 2015). Entre las variedades más reconocidas en México son el chile jalapeño, ancho, guajillo, pasilla, serrano, manzano, habanero, de árbol y piquín, siendo el jalapeño uno de los cultivos más importantes por su infinidad de usos y por la amplia distribución en todos los estados y regiones del Norte-Centro-Sur del país. Este tipo de cultivar se produce ya sea por temporal, fertirrigación, en agricultura protegida e invernaderos, y se emplean variedades tanto nativas o criollas, las cuales se diferencian por tener una corchosidad del fruto cercana al 30%, mientras que los jalapeños híbridos y mejorados, se caracterizan por presentar alta productividad, uniformidad en forma, tamaño y color de fruto y baja corchosidad menor al 15%. A su vez, las variedades criollas de la del Golfo y Sureste del país se destinan principalmente al mercado nacional en productos como encurtidos, salsas y chipotle deshidratado de alta calidad. En contraste, los híbridos del norte del país se comercializan en fresco para consumo interno y de exportación (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010).

3.5. Enfermedades del cultivo de chile

Por otra parte, el cultivo de chile enfrenta graves problemas, ya sea en campo y en los invernaderos como es el ataque de plagas y enfermedades, las cuales afectan desde la fase de almácigo, en producción y después de la cosecha, lo que conlleva a reducir la población de plantas, la calidad y cantidad del cultivo, debido a esta incidencia la severidad de las infecciones provocadas son evidentes año con año y de parcela a parcela, por lo que se debe mantener un continuo monitoreo y detección de estas enfermedades ocasionadas por patógenos como bacterias, nematodos, virus y hongos, los cuales provocan una mortalidad del 40 al 70% de las plantas, siendo así que generan podrición de la raíz y suelen ser muy perjudiciales tal como el oomycete *P. capsici*, causante de la enfermedad conocida como marchitez del chile (Velásquez-Valle *et al.*, 2013 y Majid *et al.*, 2016).

3.5.1. *Phytophthora capsici* L.

Este fitopatógeno cuenta con amplia distribución a nivel mundial, es considerado uno de los principales fitosanitarios en el cultivo de chile. Durante los temporales lluviosos, el patógeno infecta tanto las partes aéreas (tizón foliar), las ramas donde se provocan lesiones variadas y estrangulamientos. Los frutos que inicialmente son afectados debido a su cercanía al suelo, presentan lesiones acuosas de color gris a café y después se cubren de micelio tomando un aspecto “azucarado” tanto en la superficie como al interior. En la raíz, el fitopatógeno causa pudrición en la zona de transición entre el tallo y la raíz principal, lo que deriva en necrosamiento de las raíces secundarias y el síntoma característico y distintivo es el descortezamiento o “pelado” de la raíz. Este daño irrumpe el flujo de agua y nutrientes, comprometiendo la fisiología de la planta (Velásquez-Valle *et al.*, 2013).

En México, este fitopatógeno se ha reportado en los estados de Aguascalientes, Guanajuato, Chihuahua, Jalisco y Michoacán, para contrarrestar el ataque de esta enfermedad se hace mediante la aplicación fungicidas químicos como mancozeb, metalaxyl, mefenoxam, fenilamidas, propamocarb y foseil aluminio, pero su aplicación excesiva genera problemas ambientales (Velásquez-Valle *et al.*, 2013; Majid *et al.*, 2016 y Reyes-Tena *et al.*, 2020). Por

otra parte, se han buscado alternativas para el control y manejo de la enfermedad, tal como la resistencia del hospedante y el manejo adecuado de prácticas culturales (Majid *et al.*, 2016).

En concreto, se han buscado cultivares que presenten genes de resistencia contra fitopatógenos tal como Palma-Martínez, (2017) quienes evaluaron la herencia de la resistencia a *P. capsici* en líneas de chile Huacle 33.3, 34.1 y 35.3, así como en accesiones criollas provenientes de Oaxaca. Los autores revelaron que las líneas de chile Huacle 33.3 y 35.3 poseen un gen dominante de resistencia y son genéticamente distintos entre sí. Este hallazgo revela que los cultivares criollos representan una fuente valiosa de genes de resistencia con potencial para ser incorporados en los programas de fitomejoramiento y mejora de *C. annuum*.

Además, se han empleado microorganismos benéficos que contrarresten la infección por *P. capsici*, tal como demuestran Quispe-Quispe *et al.*, (2022) quienes reportan una interacción bioquímica y molecular significativa entre *P. capsici*, y diversos microorganismos biocontroladores, tales como *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Streptomyces* sp., *Trichoderma* sp., para inhibir o reducir la afectación de diversos síntomas característicos del fitopatógeno como pudrición de raíz, tallo, fruto y tizón foliar, afectando tanto las células rizodérmicas (raíces) y epidérmicas (hojas) en cultivos pertenecientes a las familias de Cucurbitáceas, Fabáceas, Rosáceas y Solanáceas, siendo *Capsicum* sp., el género principal y de interés en esta investigación. Los autores concluyen que estos microorganismos presentan una eficacia superior en comparación con algunos oomiceticidas comerciales, debido a su efecto bioestimulante que promueve el crecimiento y producción vegetal, además de inducir la activación de rutas y enzimas clave para la expresión de genes que codifican proteínas relacionadas con la patogénesis. Incluso existen reportes donde se documenta el uso de consorcios de HMA y RPCV, como estrategia de control biológico frente a *P. capsici*, en 23 cultivares de *C. annuum* L. y donde Leos-Escobedo *et al.*, (2021) reportaron el incremento de la resistencia al patógeno.

Por tal motivo, el desarrollo de estrategias agroecológicas para el manejo de los cultivos agrícolas está enfocado hacia el uso combinado de fertilizantes no tóxicos y libres de contaminantes, contribuyendo a sistemas agrícolas sostenibles. En este contexto, las

interacciones simbióticas en el suelo-planta juegan un papel clave al permitir la mejora de la absorción de nutrientes y la activación de respuestas fisiológicas frente a condiciones adversas (Vega *et al.*, 2023), como es el fitopatógeno *P. capsici* en el cultivo de chile jalapeño.

IV. Problema de investigación

La alta demanda de alimentos y el uso excesivo de agroquímicos en la agricultura ha generado impactos negativos en la salud humana, el medio ambiente y la fertilidad del suelo. En este contexto, el cultivo de chile es una hortaliza de alto valor económico, nutricional y cultural en México, siendo así que presenta graves problemas debido al cambio de las condiciones ambientales, lo que propicia la ocurrencia de enfermedades como la “marchitez del chile” que es causado por *P. capsici*, el cual, es el responsable de la marchitez, pudrición de raíces, tallos y frutos, además este patógeno presenta alta resistencia en el suelo, lo que dificulta su manejo sanitario en los cultivos debido a las estructuras de resistencia que permanecen por mucho tiempo tanto en campo como en invernadero. Si bien existen alternativas sostenibles como el uso de microorganismos antagonistas como HMA y el uso del dióxido de silicio (SiO₂), en los que individualmente se ha demostrado sus efectos benéficos en la protección vegetal en diversos cultivos de importancia económica. No obstante, existen muy pocos trabajos sobre la sinergia entre ambos, en particular bajo condiciones hidropónicas y en el cultivar jalapeño, ya que es necesario integrar y comprender tanto la susceptibilidad a la colonización micorrízica según el genotipo, el tipo de sustrato, los momentos y técnicas de inoculación, así como también establecer concentraciones óptimas de dióxido de silicio que promuevan el crecimiento vegetal y la bioprotección del chile jalapeño contra *P. capsici*.

V. Justificación

La necesidad de desarrollar estrategias agrícolas más sostenibles, ecológicas y rentables ha motivado la investigación sobre bioinsumos como los HMA y elementos benéficos como el SiO₂, los cuales permiten reducir el uso de agroquímicos y mejorar la tolerancia de las plantas ante el estrés biótico. Esta investigación se justifica en la importancia de evaluar la interacción entre los HMA y el dióxido de silicio en el cultivo de chile jalapeño bajo condiciones hidropónicas, con el objetivo de optimizar el crecimiento vegetal y reducir los efectos por *P. capsici*. Los resultados generados pueden aportar evidencia científica para el uso racional de los bioinsumos y bioestimuladores, asimismo establecer prácticas de manejo sustentables que beneficien a productores tanto a nivel mundial y local, especialmente en regiones del estado de Michoacán, el cual es el sexto productor en México.

Esta investigación tendrá relevancia en el área agrícola ya que contribuirá al fortalecimiento de modelos alternativos de producción, con un bajo impacto al ambiente y permitir el auge de la seguridad alimentaria.

VI. Hipótesis

El uso de hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA) y la aplicación combinada del dióxido de silicio (SiO₂) promueven el crecimiento vegetal y la tolerancia del chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) contra *Phytophthora capsici*, bajo condiciones de hidroponía en invernadero.

VII. Objetivo general

Evaluar el efecto en el crecimiento vegetal del chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) y bioprotección contra *Phytophthora capsici* L., al usar hongos formadores de micorriza arbuscular y dióxido de silicio, bajo condiciones de hidroponía en invernadero.

7.1. Objetivos específicos

- Cuantificar el porcentaje de colonización de los HMA en cinco cultivares de *Capsicum* spp. para selección del cultivar experimental.
- Evaluar los efectos en el crecimiento vegetal de *C. annuum* inoculado en dos tiempos con los HMA y la adición de tres dosis de SiO₂.
- Examinar la severidad causada por *P. capsici* en *C. annuum* L. inoculado con los HMA y diferentes concentraciones de SiO₂.

VIII. Resultados

8.1. Capítulo I: Susceptibilidad a la colonización micorrízica en cultivares de *Capsicum* spp.

8.1.1. Resumen

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), son simbioses obligados que requieren de las raíces de las plantas para completar su ciclo de vida, por tal motivo, es esencial que las semillas desarrollen raíces saludables durante la germinación. No obstante, la relación específica entre la micorriza y la planta genera variaciones en el grado de colonización e incluso en plantas de la misma especie, lo que influye directamente en la eficacia y dependencia micorrízica. En este trabajo, se determinó la susceptibilidad de cultivares de chile a la colonización micorrízica; para ello se emplearon cuatro cultivares de *Capsicum annuum* (jalapeño, serrano, güero, caribe) y *C. chinense* (habanero), a los que se les inoculó *Rhizophagus intraradices* y *R. fasciculatum*. Las semillas se sembraron en charolas que contenían una mezcla de arena roja y blanca (1:1 p/p), en esta se adicionaron 12 g del inóculo micorrízico. El riego se mantuvo a capacidad de campo y en condiciones ambientales naturales. Se evaluó la emergencia de las plántulas a los 14, 16 y 19 días después de la siembra (dds) y al final del experimento (40 dds), se evaluó la colonización micorrízica. Los resultados mostraron una emergencia asincrónica de los cultivares, la emergencia comenzó a los 14 dds, alcanzándose los mayores valores de emergencia a los 19 días con un 66% para el cultivar habanero y en promedio 50% para serrano y jalapeño. La colonización micorriza fue similar en los cultivares habanero, serrano y jalapeño con 75%. En los cultivares serrano y jalapeño, se observaron hifas, vesículas y arbuscúlos. En conclusión, la interacción entre las micorrizas y los cultivares presentaron limitaciones en la susceptibilidad, debido a la influencia de múltiples factores que afectaron la germinación y emergencia de plántulas, así como también hubo diferencias en las estructuras micorrízicas observadas. Estos resultados resaltan la complejidad de las relaciones micorrízicas y la necesidad de considerar las variantes genotípicas y ambientales para optimizar su uso en los sistemas agrícolas.

Palabras clave: hongos micorrízicos arbusculares, chile, hortaliza, emergencia.

8.1.2. Chapter I: Susceptibility to mycorrhizal colonization in *Capsicum* spp. cultivars

8.1.3. Abstract

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are obligate symbionts that require plant roots to complete their life cycle. Therefore, it is essential that seeds develop healthy roots during germination. However, the specific relationship between mycorrhizae and plants generates variations in the degree of colonization, even within plants of the same species, directly influencing mycorrhizal effectiveness and dependency. In this study, the susceptibility of chili cultivars to mycorrhizal colonization was determined. Four *Capsicum annuum* cultivars (jalapeño, serrano, güero, caribe) and *C. chinense* (habanero) were inoculated with *Rhizophagus intraradices* and *R. fasciculatum*. Seeds were sown in trays containing a 1:1 (w/w) mixture of red and white sand, with 12 g of mycorrhizal inoculum added. Irrigation was maintained at field capacity under natural environmental conditions. Seedling emergence was evaluated at 14, 16, and 19 days after sowing (das), and mycorrhizal colonization was assessed at the end of the experiment (40 das). Results showed asynchronous emergence among cultivars. Emergence began at 14 das, reaching maximum values at 19 days, with 66% for the habanero cultivar and an average of 50% for serrano and jalapeño. Mycorrhizal colonization was similar in habanero, serrano, and jalapeño cultivars (75%). Hyphae, vesicles, and arbuscules were observed in serrano and jalapeño. In conclusion, the interaction between mycorrhizae and cultivars presented limitations in susceptibility due to multiple factors influencing germination and seedling emergence, as well as differences in observed mycorrhizal structures. These results highlight the complexity of mycorrhizal relationships and the need to consider genotypic and environmental variants to optimize their use in agricultural systems.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi, chili, vegetable crop, seedling emergence.

8.1.4. Introducción

Los HMA, han demostrado su importancia para las plantas, ya que proveen agua, nutrientes e intervienen en el crecimiento y rendimiento vegetal, otra rasgo atribuible es que mitigan los daños por sequías y metales pesados (Willey, 2016), lo cual, los hacen útiles en la agricultura sustentable y ecológica (Devi *et al.*, 2021), esto con el fin de disminuir el uso de fertilizantes químicos, pues pueden ser utilizados como biofertilizantes o bioinoculantes debido a que mantienen el equilibrio ecológico y la adaptación de los cultivos agrícolas tanto en campo e invernadero (Altuntas, 2021). Al decidir si utilizar los HMA para algún cultivo, es necesario conocer que existen diversos cultivares o híbridos con ciertos genotipos adaptados a las diversas condiciones ambientales en que se desarrollan. A pesar de corresponder a una misma especie no son idénticos, hay diferencias tanto en forma, función y comportamiento (Rodríguez, 2018). Tal como en el caso de *C. annuum* L., esta especie presenta una mayor diversidad de variedades domesticadas que se cultivan en todo el mundo (INTAGRI, 2020). En cambio, existen poblaciones silvestres o criollas que es difícil llevarlas a germinación, debido a que poseen semillas con una testa dura (González-Córtes *et al.*, 2015). Los tipos de variedades modernas en los cultivos tienen a disminuir su diversidad genética y con el tiempo van siendo más susceptibles a plagas y enfermedades, recurriendo al uso de agroquímicos o al desarrollo y mejora genética con plantas resistentes. Sin embargo, cada vez existen menos genes disponibles debido a la erosión genética o a la desaparición de morfotipos (Rodríguez, 2018).

Es fundamental explorar el uso de los HMA en las hortalizas, con el fin de evaluar la susceptibilidad de estas plantas a la colonización micorrízica. En estudios previos han demostrado que la inoculación con una especie específica de HMA, así como consorcios, puede influir significativamente en el rendimiento de los cultivos, tal como plantean Uc-Ku *et al.*, (2019) quienes mencionan que las plantas de *Heliconia stricta*, tienden a asociarse selectivamente con cepas del hongo micorrízico *R. intraradices* comparado con el uso de mezcla de consorcios u otros HMA nativos. Asimismo, se ha observado que la respuesta micorrízica varía entre diferentes cultivos y genotipos, lo que destaca la importancia de analizar las interacciones entre la planta y estos microorganismos al emplear técnicas de inoculación adecuadas y específicas para optimizar su potencial en la agricultura (Declerck

et al., 1995; Parke & Kaeppler, 2000; Linderman & Davis, 2004 y Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022), como reportan Sensoy *et al.*, (2007) quienes evaluaron ocho genotipos de chile inoculados con *G. intraradices* y *Gigaspora margarita* obtuvieron una gran variación en la dependencia micorrízica relativa entre los genotipos de chile estudiados.

Por otro lado, las condiciones como el tipo de sistema de suelo o sustrato que se emplea en la germinación de las semillas condicionan a la micorrización como lo indican Lohman *et al.*, (2010), quienes al utilizar suelo puro, compost puro o suelo diluido con vermiculita presentaron bajos porcentajes de colonización y producción de esporas de HMA. Por este motivo, el conocimiento de la colonización micorrízica resulta fundamental, ya que proporciona información valiosa sobre la interacción eficiente entre las plantas y los HMA. La efectividad de esta simbiosis permite optimizar el crecimiento vegetal, además de facilitar la selección de especies adecuadas para programas de reforestación, restauración ecológica, cultivo e investigación (Abbott *et al.*, 1992; Dodd & Thomson, 1994 y Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022). Dado que no todas las plantas y HMA establecen asociaciones beneficiosas y eficientes, es necesario identificar estas relaciones simbióticas utilizando el porcentaje de colonización como indicador.

La especie *C. annuum* L. (chile) es una hortaliza importante en México y en el mundo (FAOSTAT, 2015). Existen trabajos que muestran el beneficio de las plantas de chile cuando son inoculadas con HMA (Davies *et al.*, 2002; Salami, 2002; Demir, 2004; Garmendia *et al.*, 2004 y Turkmen *et al.*, 2005). La eficacia de diferentes HMA en distintos genotipos de pimiento no se ha documentado adecuadamente, incluso en condiciones de plántula. Por lo que el objetivo de esta investigación fue determinar el porcentaje de colonización por HMA en cinco cultivares de chile con el objetivo de identificar cual presenta mayor colonización y presencia de estructuras micorrízicas para utilizar el cultivar como modelo de investigación con micorrizas arbusculares.

8.1.5. Metodología

8.1.5.1. Ubicación del experimento

Esta investigación se realizó en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en el laboratorio de Ecofisiología Vegetal.

8.1.5.2. Material biológico

Para este experimento, se emplearon semillas de *C. annuum* L., de los cultivares comerciales jalapeño, serrano, caribe y güero, las cuales fueron adquiridas de diversas marcas y proveedores del municipio de Morelia, Michoacán; y el cultivar criollo *C. chinense* (chile habanero), el cual fue donado por el Dr. Juan Carlos Álvarez Hernández. En la tabla 1, se presentan las características de siembra de los cultivares utilizados.

Tabla 1. Características de siembra de cada cultivar según lo especificado por la empresa.

Cultivar	TI (°C)	PS (mm)	DEP (cm)	DG	DM	CAD
Jalapeño	18-35	6 -10	60-70	8 – 12	70 – 120	12/2022
Serrano	-	< de dos veces al tamaño de la semilla	40-46	10 – 15	110	2024
Güero	Sol	3 – 5 mm	60	8 - 12	70 – 120	12/2023
Caribe	20 - 25	1 – 2 cm	40	14 - 21	110 - 120	25/nov/2 025
<i>C. chinense</i>	-	-	-	-	-	-

Acrónimos: **TI:** Temperatura ideal, **PS:** Profundidad de siembra, **DEP:** Distancia entre plantas, **DG:** Días de germinación, **DM:** Días de Maduración y **CAD:** Caducidad.

8.1.5.2.1. Hongo micorrízico

Para el inóculo de HMA, se utilizó un producto comercial el cual contiene las especies de *R. intraradices* y *R. fasciculatum*, Las especificaciones de uso del producto se indican en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones del método de uso del inóculo de micorriza indicada en la etiqueta del producto comercial.

Micorrizas	Granos y semillas	Método de uso	
		Preparación de sustrato	Almacenamiento
<i>G. intraradices</i> y <i>G. fasciculatum</i>	Humectar la semilla y cubrirla con el inóculo para que se adhiera, dejar secar y sembrar.	Mezclar un gramo de micorriza por cada litro de sustrato.	Almacene en un lugar fresco y seco alejado de la luz. Este producto no es tóxico.

8.1.5.3. Sustrato de germinación

Se utilizó una mezcla de arena roja y blanca a una proporción de 1:1 v/v, esta mezcla se esterilizó a 121 °C por 1 hora en autoclave, para garantizar que no tuviera microorganismos viables.

8.1.5.4. Establecimiento del experimento

De cada uno de los cultivares (jalapeño, serrano, güero, caribe y habanero), se seleccionaron al azar 50 semillas de un tamaño uniforme, las cuales se enjuagaron con agua corriente y se dejaron en cloro al 5% durante cinco minutos; transcurrido el tiempo se empleó un colador de plástico para recolectar las semillas y se enjuagaron con abundante agua desionizada para eliminar los residuos restantes de cloro. Por último, se dejaron las semillas en una superficie absorbente y extendidas hasta su siembra según Izquierdo y Granados (2011).

8.1.5.4.1. Siembra e inoculación de HMA

Para cada cultivar se empleó una charola de aluminio de 33 X 26.8 X 6.3 cm., a la que se le colocó el sustrato necesario para que quedara una cama de 5 cm de espesor sobre la cual se esparció 12 gramos del inóculo de HMA el cual contenía 480 esporas de HMA. Posteriormente se colocaron las semillas y se adicionó una capa de sustrato de modo que cubrieran las semillas (0.5 cm). Las charolas fueron regadas con agua desionizada hasta capacidad de campo del medio de crecimiento y se mantuvo esta condición hídrica hasta el final del experimento. Las charolas fueron colocadas entre octubre y noviembre del 2023, se mantuvieron en condiciones ambientales con una temperatura entre 14 a 25 °C (Weather Spark, 2023), para asegurar su protección, se ubicaron bajo techo y sobre una mesa dentro del laboratorio de Ecofisiología Vegetal del IIAF.

8.1.5.5. Variables de respuesta

Se evaluó la emergencia de las plántulas a los 14, 16 y 19 días después de la siembra y el experimento duró 40 días. El porcentaje de emergencia (%E) se calculó con la siguiente fórmula:

$$\%E = \frac{\text{Número de semillas que emergidas}}{\text{Número de semillas sembradas}} \times 100$$

8.1.5.6. Porcentaje de colonización micorrízica (%PCM)

A los 40 días después de la siembra, de cada cultivar se seleccionaron trece plántulas de tamaño uniforme con sus primeras cuatro hojas verdaderas, y por último se muestreó la raíz para determinar el porcentaje de colonización micorrízica. Para ello, la raíz se colocó en cassettes de inclusión para histología, y se guardó en una solución FAA (formol, ácido acético glacial y alcohol etílico al 70%; 5:5:90, v: v: v) (Suárez *et al.*, 2022) hasta su procesamiento.

Las muestras de raíces se decoloraron y tiñeron con la técnica descrita por Phillips y Hayman (1970). Asimismo, en una caja Petri se trazó una cuadrícula extendida de 1 X 1 cm; para extender la raíz de cada cultivar y cortar segmentos de 1 cm. Cada segmento se colocó en un portaobjetos, hasta completar 30 segmentos por muestra. Se cubrió con un cubreobjetos y se sellaron los bordes con barniz para uñas, esto es con el fin de asegurar la fijación de las muestras, y finalmente se rotularon con la información correspondiente.

La observación de los segmentos de la raíz se realizó con un microscopio óptico Velab, y se utilizaron los objetivos de 10X y 40X, al mismo tiempo se tomaron fotografías. Se identificaron estructuras típicas de colonización micorrízica como hifas, vesículas y arbuscúlos.

Para el cálculo del porcentaje de colonización micorrízica (%PCM), se empleó el método de McGonigle *et al.*, (1990).

$$\%PCM = \frac{\text{Número de segmentos colonizados}}{\text{Número total de segmentos observados}} \times 100$$

A su vez, para el cálculo del porcentaje de estructuras micorrízicas (%EM), hifas, arbuscúlos y vesículas se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%EM = \frac{\text{Número de EM observados en segmentos}}{\text{Número total de segmentos observados}} \times 100$$

8.1.5.7. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron procesados mediante el programa R y analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA), de una vía para en el caso del porcentaje de emergencia, colonización y estructuras micorrízicas; además, se realizó la prueba de comparación de medias mediante la prueba de Tukey a una $P < 0.05$.

8.1.6. Resultados y discusión

8.1.6.1. Porcentaje de emergencia de los cultivares de *Capsicum* spp.

El proceso de la germinación inicia con la absorción de agua en la semilla y finaliza con la emergencia, no obstante, este proceso es distinto entre las especies ya que intervienen aspectos como el tipo de la semilla y las condiciones externas (Escaso *et al.*, 2010). Con respecto al trabajo, en los cinco cultivares de *Capsicum* spp., solo se observó emergencia en los cultivares jalapeño, serrano y habanero. La emergencia ocurrió de manera asincrónica a los 14, 16 y 19 días, respectivamente, según el cultivar (Fig. 1). El día 19, fue el último registro de emergencia de plántulas, ya que durante los 40 días en que duro el experimento no se observaron más brotes en las charolas.

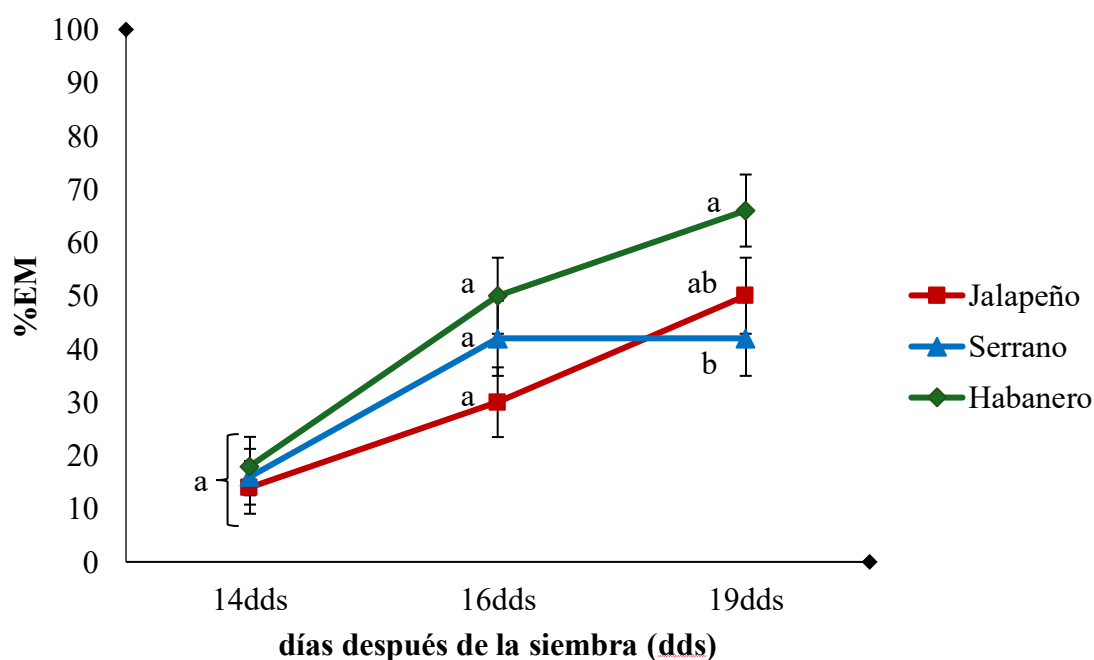


Figura 1. Porcentaje de emergencia (%EM) de los cultivares jalapeño, serrano y habanero.

Los resultados registrados y observados durante el tiempo indican un aumento en la emergencia, donde para la primera fecha de muestreo no se registraron diferencias significativas en la emergencia de los cultivares jalapeño, serrano y habanero, en promedio

registraron un 19%. Para la segunda fecha, hubo un incremento significativo del 60 y 70% en la emergencia de chile serrano y habanero respectivamente; el chile jalapeño incrementó un 50% su emergencia, sin embargo, no resultó significativa. Para los 19 dds, solo los cultivos habanero y jalapeño incrementaron su emergencia respecto a la fecha anterior. En un 65 y 50% respectivamente, siendo estadísticamente diferente en el chile habanero mientras que el cultivar serrano no se registró aumento en la emergencia. Existen estudios (Gupta *et al.*, 1990 y Gupta & Janardhanan, 1991), que destacan los beneficios de aplicar inóculos micorrízicos durante la siembra de especies vegetales. Por ejemplo, Pankaj *et al.*, (2021) observaron que las semillas de palmarosa (*Cymbopogon martinii*) inoculadas con hongos micorrízicos arbusculares mostraron un aumento significativo en la emergencia de plántulas, así como su vigor y crecimiento, en comparación con el control. En particular, el inóculo con la especie *R. intraradices*, resultó ser el más efectivo, alcanzando un porcentaje de colonización micorrízica del 36.33%. Ante estas averiguaciones se han implementado técnicas de pretratamiento, como el bioprimer o recubrimiento/cebado, en semillas de especies hortícolas y forrajeras para protegerlas de factores abióticos y bióticos, y para promover su emergencia rápida y uniforme en suelos adversos (Cardinali & Murcia, 2020; Cardarelli *et al.*, 2022 y Singh *et al.*, 2023). No obstante, en esta técnica consiste inocular en la semilla antes de la siembra con microorganismos benéficos como los hongos micorrízicos, *Rhizobium* spp, *Azotobacter* spp. y *Azospirillum* spp., Cabe destacar que en la legislación mexicana publicada en el 2004 no hace referencia específica a los bioestimulantes, sin embargo, los clasifica como Inoculantes Microbianos para tratamientos de semillas o aplicación directa al suelo, o bien, como fertilizantes o reguladores de crecimiento no sintéticos. Lo que trae a consideración que el inóculo utilizado de HMA es necesario integrar en sus especificaciones del producto la dosis, la concentración de microorganismos en una unidad específica y las hortalizas en donde se puede aplicar (Tabla 2), ya que pudo haber influido en la emergencia de los cultivos al presentar problemas en el semillero, ya que en la formación y desarrollo de los HMA es afectado por factores como el efecto estacional, la susceptibilidad de la planta, las condiciones de temperatura, la luz, humedad, pH, la aireación, la fertilización, la abundancia de inóculo, el manejo de los cultivos, los fungicidas e insecticidas y las interacciones con otros microorganismos (Frioni, 2006).

Al finalizar el experimento (40 dds), los cultivares caribe y güero no mostraron emergencia de plántulas. Esto podría deberse a varios factores o condiciones de germinación, ya que las semillas de chile de empresas comerciales suelen ser tratadas con algún tipo de recubrimiento protector fitosanitario, lo cual puede ser un factor influyente en la germinación en dichos cultivares; a pesar de que se desinfectaron previamente las semillas. Existen reportes donde se menciona que el tratamiento fitosanitario a las semillas puede afectar su germinación, Rocha *et al.*, (2020), reportan que los productos fitosanitarios aplicados en semillas de soja generaron una notable fitotoxicidad en semillas y plántulas según los métodos de germinación utilizados. En particular, los tratamientos con insecticidas tienen un impacto negativo en la germinación, afectando tanto el desarrollo inicial de las plántulas. Otro factor que pudo influir en la germinación de estos cultivares y que no se alcanzara una mayor emergencia en los otros fue la mezcla del sustrato utilizado en su germinación. Se tiene evidencia que para obtener buenos porcentajes de germinación de *Capsicum spp.*, es necesario que el medio de germinación este enriquecido con materia orgánica (Barrantes, 2020; GDM, 2023 y IrriCorp, 2023). Así mismo se ha indicado que para la siembra de las semillas de *Capsicum spp.* bajo invernadero, se han empleado sustratos para producción de plántulas de chile jalapeño y poblano una mezcla de peat moss y perlita (Carrillo *et al.*, 2021); en pimiento emplearon Monge-Pérez y Loría-Coto (2021) fibra de coco molida y abono orgánico (1:1 v/v). En chile jalapeño, utilizaron Zaraut y Flores (2023) una mezcla de 1:1 (v/v) de peat moss y tezontle. Villa *et al.*, (2009) para la siembra de tres híbridos del chile bell utilizaron turba (peat moss), al igual que Moreno *et al.*, (2014) para la siembra del chile húngaro. Por otra parte, González-Cortéz *et al.*, (2015) emplearon para la germinación del chile amashito un sustrato comercial y de grado hortícola. No obstante, DANE (2015) reporta que para el cultivo de pimentón se deben considerar aspectos del suelo como textura media a franca arenosa, estructura suelta y de buen drenaje, con buena fertilidad y pH de 5.8 a 7.0. Dado a la naturaleza del experimento se utilizó el sustrato inerte de arena roja y blanca estéril debido a que no intervinieran cualquier inóculo nativo de HMA proveniente del sustrato, pero afectaron los porcentajes de emergencia.

Otro aspecto clave en el proceso de siembra es la profundidad en la que se colocan las semillas en las charolas. Según Martínez y Moreno (2009), la profundidad ideal es de 1 a 2 cm, ya que, si se siembran demasiado profundo, puede dificultar la germinación. Por el

contrario, si se colocan a menor profundidad, existe el riesgo de que las semillas se deshidraten. Por lo tanto, es esencial garantizar esta profundidad óptima para maximizar el éxito de la germinación. En este experimento, se siguieron las especificaciones indicadas para cada cultivar (Tabla 1). En el caso del chile habanero, se tomó como referencia lo indicado por la empresa productora del cultivar jalapeño.

Con respecto al recubrimiento de las semillas de chile con los HMA, es un tema que se ha abordado de menor medida, ya que en su mayoría se utilizan especies bacterianas promotoras del crecimiento en plantas, rizobios, *Trichoderma* (Rocha *et al.*, 2019), no obstante, Meo *et al.*, (2024) reportan que remojar por 24 horas las semillas de las variedades de chile (Tangguh F1 y MB-333 F1) de *C. annuum* en solución micorrízica, presentaron tasas de germinación del 82.7 y 81.6% en comparación a tiempos largos de remojo como de 48 y 72 hrs, ya que disminuye la germinación en ambas variedades de chile, por ello, es necesario considerar el tiempo adecuado de remojo para propiciar la germinación, debido a que las semillas de chile biocebadas con micorrizas absorben el agua más rápidamente y el poder germinativo es mayor. Con respecto al trabajo, se tiene que considerar en mantener el tiempo de remojo de las semillas con los HMA, dado que si no hay dicho procedimiento existen valores bajos de germinación o incluso no existe como en los cultivares caribe y güero.

8.1.6.2. Porcentaje de colonización micorrízica de los cultivares de *Capsicum* spp.

El reconocimiento planta-hongo es un proceso complejo y cada uno de los simbiontes emiten y perciben señales para su establecimiento y funcionamiento, pues aparentemente la planta es quien controla la asociación (Ramírez & Rodríguez, 2010). De los segmentos de raíces muestreados a los 40 dds y observados, se cuantificó el porcentaje de colonización micorrízica (Fig. 2). Los resultados muestran que no hubo diferencias significativas entre los cultivares jalapeño (75%), serrano (78.3%) y habanero (71.7%). Al tratarse de cultivares del mismo género, era esperable que presentaran valores similares de colonización micorrízica. Estos valores fueron altos en comparación con otros estudios en Chile, como el de Reyes *et al.*, (2016), quienes reportaron un 33.6% de colonización micorrízica en Chile serrano después de 56 días de la inoculación con *R. intraradices* mientras que para Chile poblano presentaron alrededor de 79.96 %.

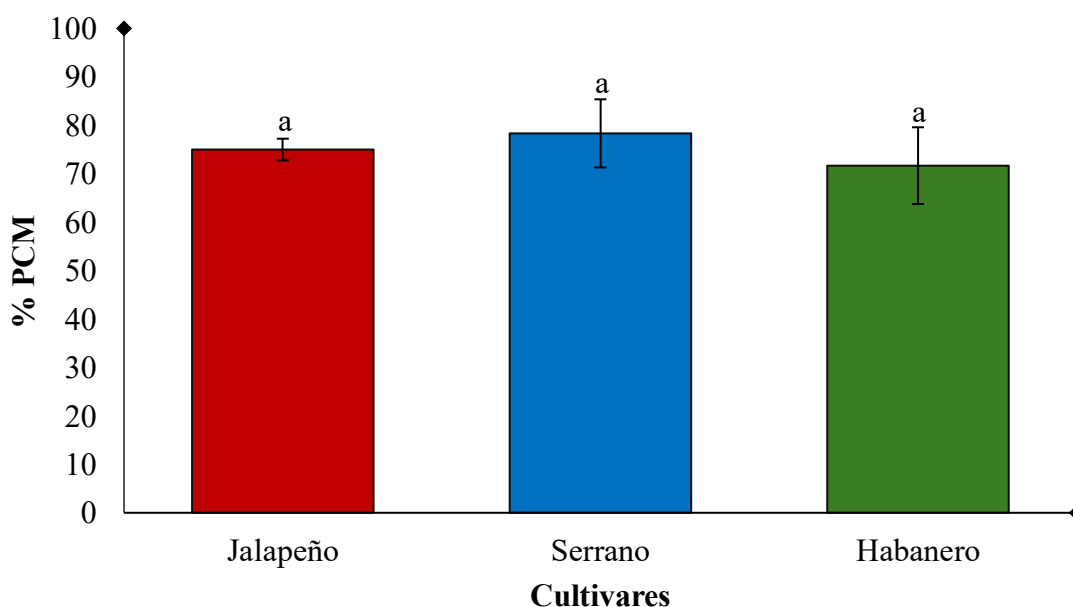


Figura 2. Porcentaje de colonización micorrízica en cultivares de Chile a los 40 dds.

Sin embargo, para ambos cultivares al usar consorcios micorrízicos la colonización micorrización oscila entre 44.96 a 84.82% en Chile serrano y de 43.40 a 93.30% en poblano. De igual manera, Nguyen *et al.*, (2017), demostraron que al aplicar una mezcla comercial de HMA (*R. intraradices*, *G. mosseae*, *G. etunicatum*, *G. claroideum*, *G. microaggregatum* y *G.*

geoporum) en tres híbridos de chile y en condiciones de campo, mostraron tasas de colonización micorrízica de hasta 50% y además mejoraron el crecimiento y rendimiento del fruto en plantas de pimiento. A su vez Sensoy *et al.*, (2007) observaron que el grado de colonización radicular varió entre los diferentes genotipos de chile (Karaisali, N52, Hatay I.S., Alata 42, Demre, Kandil, Serrano C y Cayene L.S.) inoculados con especies de HMA (*R. intraradices* y *Gigaspora margarita*). Según los autores, los rangos de intensidad de colonización para *G. margarita* estuvieron entre 31.11 a 58.89%, mientras que para *R. intraradices* oscilaron entre 16.57 a 71.11%. Concluyen que la variación en la respuesta a los HMA entre cultivares es significativa, destacando la importancia de identificar combinaciones óptimas entre los cultivares y HMA para maximizar los beneficios de la simbiosis. Es probable que exista una mayor colonización cuando se emplean consorcios que cuando se utiliza un inóculo monoespecífico debido a la posible selectividad hongo-planta. En este estudio, la aplicación de un inóculo comercial con *R. intraradices* y *R. fasciculatum* mostró porcentajes elevados de colonización. Según Castillo *et al.*, (2009), la compatibilidad entre hongo y la planta es efectiva para proporcionar beneficios, aunque la infectividad es limitada, ya que no se logra una amplia colonización de las raíces. No obstante, la estacionalidad de la planta podría influir en la respuesta de colonización micorrízica, como lo demuestran Hernádi y Posta (2013), en su estudio utilizaron un inóculo comercial con seis especies de *Glomus* spp. en híbridos de *C. annuum* L. var. *longum* cv. Szegedi y Kalocsai, observaron un incremento en el porcentaje de colonización durante el desarrollo vegetativo, seguido de una ligera disminución en la etapa de cosecha.

En ocasiones el uso de consorcios comerciales de HMA suelen arrojar valores bajos de colonización micorrízica comparado con el uso de una cepa de HMA, tal como reporta Gutiérrez, (2016) quien examinó la compatibilidad de cinco variedades de chile: pimiento morrón EZ1, chile ancho EZ2 (Enza Zaden), chile serrano Camino Real (Harris Moran), chile costeño (proveniente de Camécuaro) y una variedad de chilaca criolla (proveniente de Queréndaro) junto con las cepas de HMA (*R. irregularis* cepa BEG87 y los inóculos comerciales Rizofermic (consorcio de 12 especies) y Biosustenta, donde indica que existen diferencias entre los inóculos siendo la especie *R. irregularis* la que mostró mayor compatibilidad con todos los genotipos de chile y teniendo valores altos de porcentajes de colonización de 45 a 5% en los inóculos comerciales, lo cual refleja la compatibilidad

funcional de HMA en las plantas de chile proporcionando un mayor desempeño vegetal en variables de peso seco de la parte aérea y peso seco de la raíz.

A pesar de que la colonización fue similar en los tres cultivares, cuando se analizó por tipo de estructura micorrízica se encontraron diferencias significativas entre los cultivares (Fig. 3). La presencia de hifas, arbuscúlos y vesículas evidencia esta asociación y el desarrollo del hongo simbiótico en el sistema radical de la planta. Las vesículas actúan como órganos de almacenamiento de grasas y aceites, mientras que las hifas participan en la estructura activa y funcional para la nutrición mineral de la planta y en la propagación del endófito (Frioni, 2016).

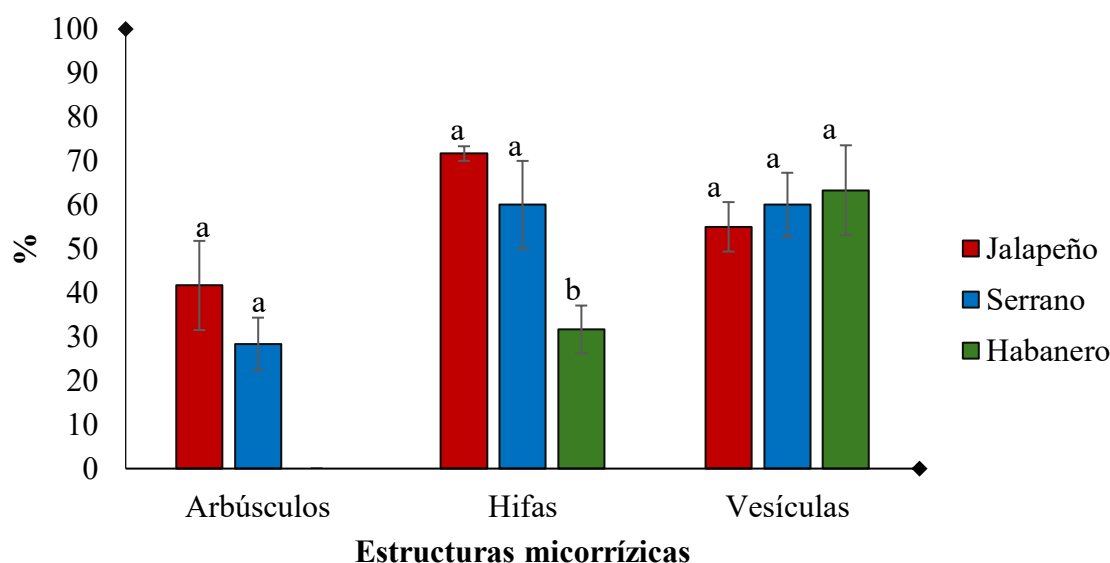


Figura 3. Porcentaje de estructuras micorrízicas en los cultivares de *Capsicum* spp.

En chile jalapeño fue donde se observaron la mayor cantidad de hifas y arbuscúlos 71 y 41% respectivamente, sin embargo, resultaron estadísticamente iguales respecto al cultivar serrano. Para el chile habanero no se observaron arbuscúlos y tuvo el menor porcentaje de hifas (Fig. 3 y 4). Esto concuerda con Sensoy *et al.*, (2007) al indicar variación entre las estructuras micorrízicas, con formaciones vesiculares que iban de escasas a densas, además de la ausencia de hifas internas en los genotipos Karaisali inoculado con *G. margarita* y Serrano C inoculado con *G. intraradices*. En la presente investigación, la presencia de arbuscúlos fue considerada como un indicador clave para garantizar el éxito de la colonización micorrízica, debido a que estas estructuras tienen un aspecto arborescente y es

aquí donde existe el intercambio de nutrientes con el hospedero, su viabilidad solo dura por algunos días y después es digerido por la planta y su formación recomienza (Frioni, 2006). Asimismo, en huertos naturales, las estructuras micorrízicas varían según la dinámica estacional. Cortes-Sarabia *et al.*, (2009) reportan que los porcentajes de arbuscúlos son bajos durante la sequía y en plantas completamente defoliadas, mientras que aumentan en plantas con hojas durante épocas de mayor precipitación. Además, observaron una mayor presencia de vesículas antes de la defoliación y la sequía, así como de hifas en plantas defoliadas durante la sequía. Por otra parte, Cruz y Morón-Ríos (2021) destacan que la colonización micorrízica en plántulas de maíz es mayor en suelos con quema, aunque observaron una disminución en la presencia de arbuscúlos. En contraste, en plántulas de pepino y maíz blanco cultivadas en suelos sin quema, los porcentajes de arbuscúlos aumentan. Esto llevo a los autores a concluir que la propagación de los HMA debe considerarse el manejo previo del suelo, la elección de la especie y variedad de la planta trampa.

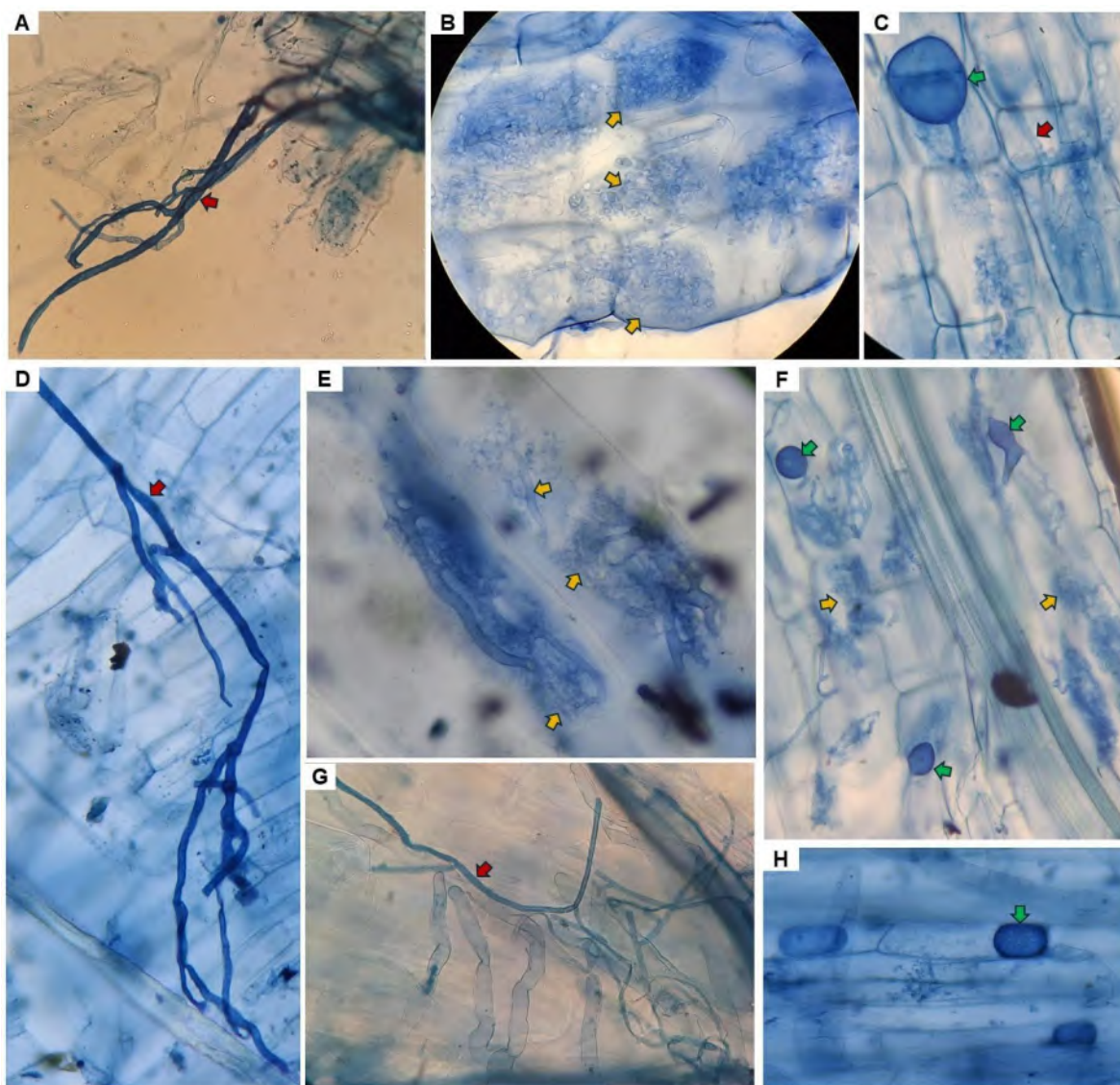


Figura 4. Estructuras micorrízicas de los cultivares: A-C chile jalapeño; D-F chile serrano y G, H chile habanero. Color de las flechas: rojas indican las hifas, verdes señalan vesículas y amarillas muestran los arbúsculos.

Las diferencias en las estructuras micorrízicas observadas es resultado de varios factores como lo mencionan Barrantes, (2020) y Othman, (2024), que indican que la ausencia de suelo en sustratos de germinación puede modificar el microambiente y las condiciones necesarias para la colonización de los HMA. Se sabe que las esporas de HMA germinan a las 24 horas después de su inoculación y requieren hasta 26 días para desarrollarse por completo (Azcon, 1987). Las esporas recién germinadas formaron simbiosis con las semillas recién germinadas

para completar su ciclo de vida, de tal manera que tuvieron que desarrollar hifas para colonizar la radícula recién formada. Así mismo la planta produce hormonas durante la etapa inicial del desarrollo radicular, como estrigolactonas, auxinas, ácido abscísico y ácido salicílico, para favorecer el desarrollo de asociaciones micorrízicas (Foo *et al.*, 2013). El hecho de tener una mayor cantidad de arbuscúlos le proporciona a la plántula recién formada una ventaja ya que, es a través de estas estructuras donde se da el intercambio de agua y nutrientes por parte del hongo y carbohidratos por parte de la planta (Smith & Read, 2008).

Al momento de estar observando e identificando estructuras micorrízicas en las preparaciones de raíces, se observó también la presencia de hifas septadas (Fig. 5), lo que sugiere la posible presencia de endófitos (endófitos septados oscuros), por lo que se requiere de una investigación más detallada al respecto. Los hongos endófitos septados oscuros (HESO), son pertenecientes al filo Ascomycota y caracterizados por la presencia de hifas melanizadas septadas y estructuras microesclerociales, se ha reportado que coexisten con los HMA y protegen a la planta de diferentes tipos de estrés (Mandyam & Jumpponen, 2005); Newsham, 2011 y Pandey *et al.*, 2020). Existen reportes de este tipo de microorganismos en distintas especies y se cree son multifuncionales y muy probablemente tengan funciones parecidas a las atribuidas a los hongos micorrízicos (Mandyam & Jumpponen, 2005).

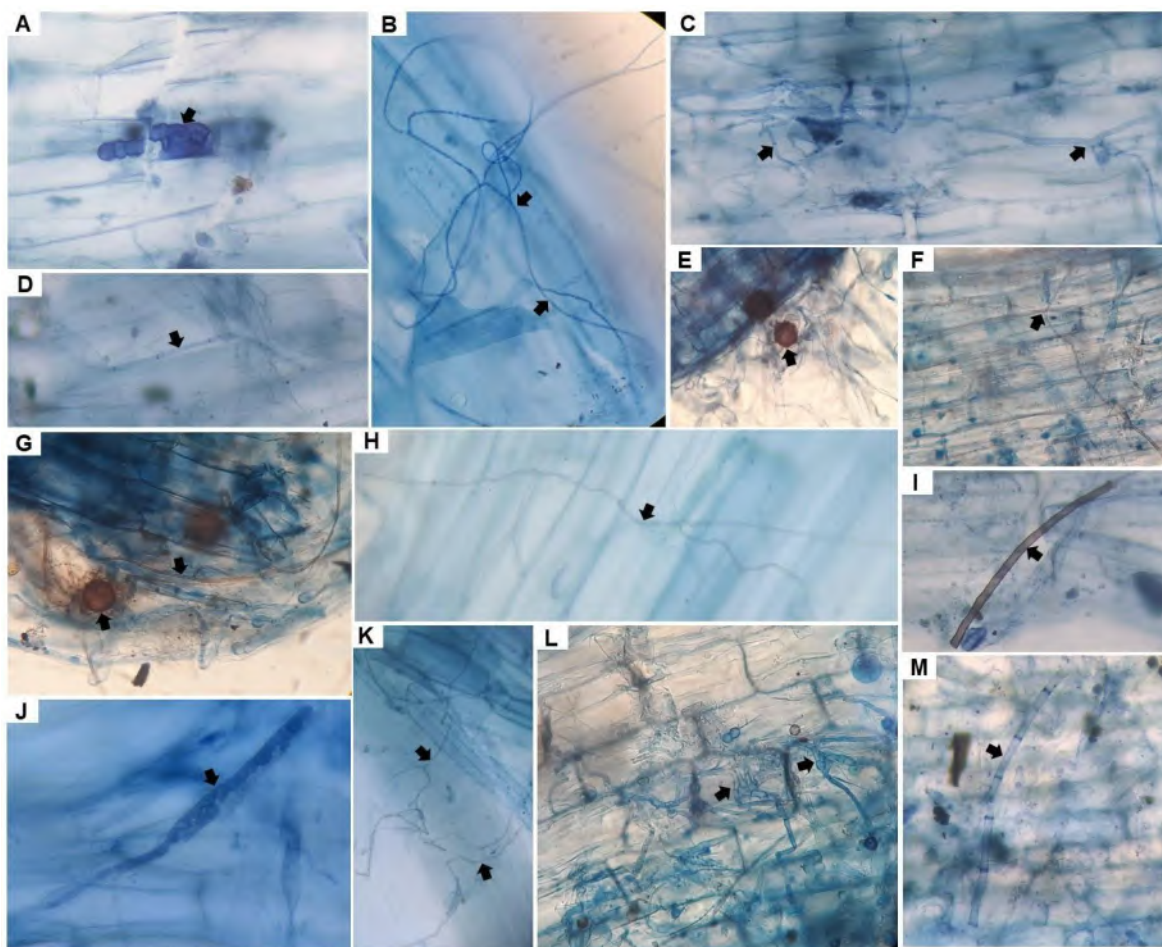


Figura 5. Observación de hongos endófitos septados oscuros (HESO) en los cultivares de *Capsicum* spp. A-F: HESO en chile jalapeño, G: chile serrano y H-M: en chile habanero.

Un estudio realizado por Di Barbaro *et al.*, (2017) en donde determinaron un 97% de colonización de HMA nativos, así como la presencia de arbuscúlos y vesículas con una frecuencia de aparición de 34 y 21% en las raíces de *Helianthus tuberosus* L. y a su vez estuvieron simultáneamente colonizadas por endófitos septados oscuros nativos, esta colonización dual es debido a que ambos endófitos están presentes en los agroecosistemas, se encuentran en asociación con la especie vegetal debido a las condiciones aptas del ambiente y suelo sin perturbaciones o sea sin historial de cultivo. Lo que trae a consideración que se encuentren estos microorganismos tanto en las semillas de los cultivares, en el sustrato utilizados a pesar de que se haya esterilizado, en el inóculo o incluso en el agua.

El conocimiento profundo de las múltiples asociaciones en la rizósfera podría permitir aplicaciones de endófitos diseñadas con precisión y eficacia, incluyendo la preparación de comunidades sintéticas, el recubrimiento de semillas y producción de metabolitos secundarios (Muthukumar & Sathya, 2017).

8.1.7. Conclusiones

Se tuvo una respuesta diferencial en el tiempo en la emergencia de las semillas, la cual pudo deberse al régimen de estas y a la presencia de los hongos micorrízicos arbusculares. El cultivar habanero obtuvo los mayores porcentajes de emergencia (66%), seguido de jalapeño y serrano. No se observó emergencia en los cultivares güero y caribe. La colonización micorrízica fue similar en los cultivares jalapeño, serrano y habanero; sin embargo, en los cultivares jalapeño y serrano se observaron mayores porcentajes de hifas, vesículas y arbusculos, lo cual le confiere cierta ventaja respecto al cultivar habanero donde no se observaron arbusculos. Con fines experimentales de trabajos con cultivares chile y HMA es recomendable trabajar con la variedad jalapeño al presentar mayores estructuras micorrízicas y buenos porcentajes de emergencia. Además, se observaron endófitos septados oscuros en las preparaciones lo cual abre una nueva perspectiva del papel que pueden estar desempeñando estos organismos en asociaciones con otros microorganismos de la rizósfera y la misma planta.

8.1.8. Literatura consultada

Abbott, L. K., Robson, A. D. & Gazey, C. (1992). Selection of inoculant vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. En J. R. Norris, D. J. Read & A. K. Varma (Eds.), *Methods in microbiology* (Vol. 24, pp. 1-21). Academic Press.

- Altuntas, O. (2021). Chapter. Production of Vegetable Crops by Using Arbuscular Mycorrhizae. En R. Radhakrishnan (Ed.), Mycorrhizal Fungi. Utilization in Agriculture and Forestry. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.97552
- Azcon, R., (1987). Germination and hyphal growth of *Glomus mosseae* in vitro: Effect of rhizosphere bacteria and cell-free culture media. *Soil Biology and Biochemistry*, 19: 417–419.
- Barrantes, J. L. (2020). Manual de recomendación en el cultivo de chile, pimentón o ají (*Capsicum* spp.). MA/INTA. <https://platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/00/00380-manualchile.pdf>
- Cardarelli, M., Woo, S. L., Rouphael, Y. & Colla, G. (2022). Seed treatments with microorganisms can have a biostimulant effect by influencing germination and seedling growth of crops. *Plants*, 11,259. DOI: 10.3390/plants11030259
- Cardinali, F. J. & Murcia, L. M. (2020). Fundamentos fisiológicos de la germinación: aspectos morfoanatómicos de las semillas: test de calidad de semillas. Mar del Plata: EUDEM. 210 pp.
- Carrillo, P. E., Martínez, H. L. P., Casiano, H. H., Hernandez, A. D. L., Padilla, M. C. M. & Rodriguez, T. M. A. (2021). Manual de producción de chile jalapeño y poblano (*Capsicum annuum*) bajo invernadero. <https://planificacionfesaragon.com/sites/default/files/manuales/Manual%20de%20Produccion%20de%20Chiles%20Jalape%C3%B1o%20y%20Poblano%20Bajo%20Invernadero.pdf>
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S. & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botánica Mexicana*, 129: e1938. DOI: 10.21829/abm129.2022.1932
- Castillo, C. G., Ortiz, C. A., Borie, F. R. & Rubio, R. E. (2009). Respuesta de ají (*Capsicum annuum* L.) cv. “Cacho de Cabra” a la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares. *Información Tecnológica*, 20(4):3-14. DOI: 10.4067/S0718-07642009000400002

- Cortes-Sarabia, J. Pérez-Moreno, J., Delgadillo, M. J., Ferrera-Cerrato, R. & Ballesteros-Patrón, G. (2009). Estacionalidad y microorganismos rizosféricos de (*Annona diversifolia* Saff.) en huertos naturales del trópico seco. *Terra Latinoamericana*, 27(1):27-34. <https://scielo.org.mx/pdf/tl/v27n1/v27n1a4.pdf>
- Cruz, K. Y. P. & Morón-Ríos, A. (2021). Influencia del manejo de suelo en la colonización temprana de tres especies de plantas trampa por hongos micorrizógenos arbusculares. <https://www.sidalc.net/search/Record/KOHA-OAI-ECOSUR:63418/Description>
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2015). El cultivo del pimentón (*Capsicum annuum* L) bajo invernadero. Boletín mensual. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_jul_2015.pdf
- Davies, Jr. F. T., Olalde-Portugal, V., Aguilera-Gomez, L., Alvarado, M.J., Ferrera-Cerrato, R.C. & Boutton, T.W. (2002). Alleviation of drought stress of Chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis) with arbuscular mycorrhiza indigenous to Mexico. *Sci. Hort*, 92, 347–359. DOI: 10.1016/S0304-4238(01)00293-X
- Declerck, S., Plenchette, C. & Strullu, D.G., (1995). Mycorrhizal dependency of banana (*Musa acuminata*, AAA group) cultivar. *Plant Soil*, 176, 183–187.
- Demir, S., (2004). Influence of Arbuscular Mycorrhizae (AM) on some physiological growth parameters of pepper. *Turkish J. Biol.* 28, 85–90.
- Devi, S. H., Bhupenchandra, I., Sinyorita, S., Chongthan, S.K. & Lamalakshmi, D. E. (2021). Chapter: Mycorrhizal fungi and sustainable agriculture. En: Ohyama, T. y Inubushi, K. (Edit.). Nitrogen in agricultura. Physiological, agricultural and ecological aspects. IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.99262
- Di Barbaro, G., Andrada, H., González, B. V., Alurralde, A. L., Del Valle, E. & Brandán de W. C. (2017). Micorrizas arbusculares y hongos septados oscuros nativos en topinambur (*Helianthus tuberosus* L.) en Catamarca, Argentina. *Revista de ciencias Agrícolas*, 34(2):98-106. DOI: 10.22267/rcia.173402.75

- Dodd, J. C., & Thomson, B. D. (1994). The screening and selection of inoculant arbuscular-mycorrhizal and ectomycorrhizal fungi. *Plant and soil*, 159, 149-158.
- Escaso, S. F., Martínez, G. J. L. & Panelló, C. M. R. (2010). Fundamentos básicos de fisiología vegetal y animal. Pearson Educación, 264 pp.
- FAOSTAT, (2015). Statistic Database. <http://apps.fao.org/>
- Frioni, L. (2006). Microbiología: básica, ambiental y agrícola. Universidad de la República- Facultad de Agronomía.
- Foo, E., Ross, J.J., Jones, W.T. & Reid, J.B. (2013). Plant hormones in arbuscular mycorrhizal symbioses: an emerging role for gibberellins. *Annals of Botany*, 111: 1–11.
- Garmendia, I., Goicoechea, N. & Aguirolea, J. (2004). Effectiveness of three *Glomus* species in protecting pepper (*Capsicum annuum* L.) against verticillium wilt. *Biol. Contr.* 31, 296–305.
- GDM (Grow Depot México). (2023). Semillas de chile húngaro (Güero). <https://growdepotmexico.com/producto/semillas-de-chile-hungaro-guero/>
- Gupta, M.L., Janardhanan, K.K., Chattopadhyay, A. & Husain, A. (1990). Association of *Glomus* with palmarosa and its influence on growth and biomass production. *Mycological Research*, 94: 561–563.
- Gupta, M.L. & Janardhanan, K.K. (1991). Mycorrhizal association of *Glomus aggregatum* with palmarosa enhances growth and biomass. *Plant and Soil*: 131, 261–263.
- González-Córtez, N., Jiménez, V. R., Guerra, B. E. C., Silos, E. H. & Payro de la C. E. (2015). Germinación del chile amashito (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) en el sureste mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (11): 2211-2218. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6nspe11/2007-0934-remexca-6-spe11-2211.pdf>
- Gutiérrez, O. J. M. (2016). Compatibilidad funcional de micorrizas en el cultivo de chile para el control biológico de *Phytophthora capsici*. Tesis de Maestría en Producción Agropecuaria. UMSNH.

- Hernádi, I. & Posta, K. (2013). Real-case application of mycorrhizal inoculums on *Capsicum annuum* L. var. *longum* cv. Szegedi and Kalocsai. *International Journal of Horticultural Science*, 19(1-2):75-79
- INTAGRI. (2020). Cultivo de chile en México. Serie Hortalizas, (21). Artículos Técnicos de INTAGRI. Mexico. Pp: 6.
https://www.intagri.com/public_files/21.%20Cultivo%20de%20Chile%20en%20Mexico.pdf
- INVAM (The International Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi). (2025). Species Descriptions. The University of Kansas. <https://invam.ku.edu/species-descriptions>
- IrriCorp. Insumos agrícolas. (2023). Semillas de Chile Güero: ¡Descubre cómo cultivar este delicioso y picante chile en casa! <https://irricorp.com.mx/product-page/semillas-de-chile-guero/>
- Izquierdo, J. & Granados-Ortiz, S. (2011). Manual técnico. Producción artesanal de semillas de hortalizas para la huerta familiar. FAO. Santiago Chile. Pp: 98.
- Linderman, R.G. & Davis, A. E. (2004). Varied response of marigold (*Tagetes* spp.) genotypes to inoculation with different arbuscular mycorrhizal fungi. *Sci. Hort.* 99: 67–78.
- Lohman, M., Ziegler-Ulsh, C. & Douds, D. (2010). Como inocular hongos micorrízicos arbusculares en la granja, Parte 1. <https://rodaleinstitute.org/es/ciencia/art%C3%ADculos-y-publicaciones/c%C3%B3mo-inocular-hongos-micorr%C3%ADzicos-arbusculares-en-la-granja-parte-1/>
- Mandyam, K. & Jumpponen, A. (2005). Seeking the elusive function of root-colonizing dark septate endophytic fungi. *Stud Mycol*, 53:173–189
- Martínez de la C. J. & Moreno, C. E. (2009). Manual técnico del manejo de chiles en campo abierto.
https://drive.google.com/file/d/1xNQYdvoz2NHDfmZYqWPZT_CF4rQITzV/view

- McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L. & Swan, J. A. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New phytologist*, 115(3): 495-501. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x
- Meo, M. M., Bao, A. P. & Demu, M. (2024). The effectiveness of seed biopriming with mycorrhiza fungi as an effort to improve the quality of germination and curly chili production (*Capsicum annuum*). *Jurnal Biologi Tropis*, 24(1b):148-155. DOI: 10.29303/jbt.v24i1b.8029
- Monge-Pérez, J. E. y Loría-Coto, M. (2021). Producción de chile dulce en invernadero: correlación entre densidad de siembra y variables de rendimiento. *Tecnología en Marcha*, 34(2):161-176. DOI: 10.18845/tm.v34i2.4983
- Moreno, R. A., Rodríguez, D. N., Reyes, C. J. L., Márquez-Quroz, C. & Reyes, G. (2014). Comportamiento del chile húngaro (*Capsicum annuum*) en mezclas de vermicompost-arena bajo condiciones protegidas. *Rev. FCA UNCUYO*, 46(2):97-11. <https://www.scielo.org.ar/pdf/refca/v46n2/v46n2a08.pdf>
- Muthukumar, T. & Sathya, R. (2017). Endorhizal fungi association and colonization patterns in solanaceae. *Polish Botanical Journal*, 62(2):287-299. DOI: 10.1515/pbj-2017-0016
- Newsham, K. K. (2011). A meta-analysis of plant responses to dark septate root endophytes. *New Phytol*, 190:783–793
- Nguyen, H. D., Vo, A. T. & Posta, K. (2017). Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth yield of three pepper genotypes. *Columella*, 4(1):49-52. DOI: 10.18380/SZIE.COLUM.2017.4.1.suppl
- Othman, Y. A., Alananbeh, K. M. & Tahat, M. M. (2024). ¿Can Arbuscular Mycorrhizal Fungi Enhance Crop Productivity and Quality in Hydroponics? A Meta-Analysis. *Sustainability*, 16(9),3662. DOI: 10.3390/su16093662
- Pandey, R. R., Loushambam, S., & Srivastava, A. K. (2020). Arbuscular mycorrhizal and dark septate endophyte fungal associations in two dominant ginger species of

- northeast India. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 90: 885-894.
- Parke, J. L. & Kaeppler, S.W. (2000). Effects of genetic differences among crop species and cultivars upon the arbuscular mycorrhizal symbiosis. En Kapulnik, Y., Douds, Jr., D.D. (Eds.), *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Kluwer Academic Publication, pp. 131–146.
- Phillips, J. M. & Hayman, D. A. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55, 158-161. DOI: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3
- Ramírez, G. M. & Rodríguez, V. A. (2010). Señales de reconocimiento entre plantas y hongos formadores de micorrizas arbusculares. Corpoica. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(1):53-60. DOI: 10.21930/rcta.vol11_num1_art:195
- Reyes, T. A., Quiñones, A. E. E., Rincon, E. G. & López, P. L. (2016). Micorrización en *Capsicum annuum* L. para la promoción de crecimiento y bioprotección contra *Phytophthora capsici* L. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(4), 857-870. Recuperado en 28 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000400857&lng=es&tlng=es.
- Rocha, K. D., Carvalho, R. E., Oliveira, P. R. M., Oliveira dos S. H., Carvalho, P. A. & Bernardes de A. D. (2020). Does the substrate affect the germination of soybean seeds treated with phytosanitary products? *Agricultural Sciences. Ciência e Agrotecnologia*, 44: e020119. DOI: 10.1590/1413-7054202044020119
- Rocha, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Vosátka, M., Freitas, H. & Oliveira, R. S. (2019). Seed coating: a tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. *Front. Plant Sci.* 10:1357. DOI: 10.3389/fpls.2019.01357
- Rodríguez, C. E. (2018). La diversidad genética de *Capsicum annuum* de México. En: IRD Éditions. Los chiles que le dan sabor al mundo [en línea]. DOI: 10.4000/books.irdeditions.30922.

- Salami, A.O. (2002). Influence of mycorrhizal inoculation on disease severity and growth of pepper (*Capsicum annuum* L.). Arch. Acker-Pfl. Boden, 48, 257–262
- Sensoy, S., Demir, S., Turkmen, O., Erdinc, C., & Savur, O. B. (2007). Responses of some different pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes to inoculation with two different arbuscular mycorrhizal fungi. Scientia horticulturae, 113(1), 92-95.
- Singh, P., Vaishnav, A., Liu, H., Xiong, C., Singh, B. H. & Singh, K. B. (2023). Seed biopriming for sustainable agriculture and ecosystem restoration. *Microbial Biotechnology*, 16:2212-2222. DOI: 10.1111/1751-7915.14322
- Smith, S. & Read, D. (2008). Mycorrhizal Symbiosis. Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6
- Suárez, A. S., Di P. M. A, Cardozo, P. G. & Travaglia, C. N. (2022). Técnicas de histología vegetal: un bordaje para su utilización en microscopía óptica. Río Cuarto: Un Río Editora, pp: 40.
- Turkmen, O., Demir, S., Sensoy, S. & Dursun, A. (2005). Effects of arbuscular mycorrhizal fungus and humic acid on the seedling development and nutrient content of pepper grown under saline soil conditions. *J. Biol. Sci.* 5(5), 568–574.
- Uc-Ku, A. G., Arreola-Enríquez, J., Carrillo-Ávila, E., Osnaya-González, Ma. M., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R. & Landeros-Sánchez, C. (2019). Inoculacion de hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo de *Heliconia stricta*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(5):1057-1069. DOI: 10.29312/remexca.v10i5.1608
- Villa, C. M., Catalán, V. E. A., Insunza, I. M. A., Román, L. A., González, L. M. de L. & Valdéz, A. J. (2009). Cultivares y nutrición de chile pimiento (*Capsicum annuum* L.) en invernadero de clima controlado. *Biotechnia*, 22(2): 13-20. <https://www.redalyc.org/pdf/6729/672971161002.pdf>
- Weather Spark. (2023). El tiempo en Morelia en 2023 (México). <https://es.weatherspark.com/h/s/4452/2024/2/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-del-oto%C3%B1o-2024-en-Morelia-M%C3%A9xico#Figures-Temperature>

- Willey, N. (2016). Chapter 6. Phosphorus. En: Willey, N. (Ed.), *Environmental Plant Physiology*. (pp: 173). Garland Science, Taylor & Francis Group, LLC.
- Zaraut, C. M. & Flores, M. A. (2023). Solución nutritiva en el cultivo de chile jalapeño (*Capsicum annuum*) en invernadero. Informe de conclusión de servicio social. Universidad Autónoma Metropolitana.
<https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/retrieve/7e1a2a32-aad5-46e7-aa64-8b9e7b249dd1/252413.pdf>

8.2. Capítulo II. Inoculación con hongos micorrízicos arbusculares y distintas concentraciones de dióxido de silicio, sobre el crecimiento de plantas de chile (*Capsicum annuum* L) cv. jalapeño, en condiciones hidropónicas

8.2.1. Resumen

El uso de hongos formadores de micorriza (HMA) y elementos benéficos como el silicio (Si), ha tomado gran relevancia en los últimos años como una manera de promover el crecimiento vegetal y contrarrestar ciertos tipos de estrés. Existen estudios donde demuestran el efecto sinérgico de los HMA y Si, pero poco en el cultivo de chile en particular en hidroponía, por lo que en este trabajo se evaluó el efecto en el crecimiento vegetal de plantas de chile jalapeño mediante el uso de HMA y distintas concentraciones de dióxido de silicio en el agua de riego. Las plantas de chile se establecieron en macetas de plástico de 1 litro, las cuales tenían una mezcla estéril de peat-most, agrolita y vermiculita (3:2:1 v/v), como medio de crecimiento. La inoculación con los HMA se realizó en dos momentos, uno a la siembra y otro al momento del trasplante. A los 26 días después del trasplante se les adicionó semanalmente, en el agua de riego, tres diferentes concentraciones de Si (0 gL⁻¹, 50 gL⁻¹ y 100 gL⁻¹), en todo momento el medio de crecimiento se mantuvo a capacidad de contenedor, regándose con agua desionizada y una vez por semana se aplicó una solución nutritiva Hoagland. Se utilizó un diseño completamente al azar con nueve tratamientos y repetidos 10 veces cada uno, la unidad experimental fue una maceta con una planta. A los 80 días después del trasplante se registraron las variables agronómicas de crecimiento y la colonización micorrízica. Los resultados mostraron un efecto significativo ($P < 0.05$) de los factores y su interacción sobre las variables evaluadas. Se encontró que cuando la concentración de silicio pasó de 0 a 50 gL⁻¹ se registró un incremento en la mayoría de las variables evaluadas, pero cuando se alcanzó la máxima concentración de silicio (100 gL⁻¹), se observó un efecto negativo en el crecimiento independientemente si se micorrizaban a la siembra o al trasplante, sin embargo, el efecto fue menor cuando no se micorrizaban las plantas. No obstante, los resultados mostraron sinergismo de los HMA y el Si en el crecimiento de plantas de chile pero cuando estas se micorrizaban al trasplante y contrarrestaba la concentración de Si alta.

Palabras clave: chile jalapeño, SiO₂, micorriza, desarrollo vegetal.

8.2.2. Chapter II: Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and different concentrations of silicon dioxide on the growth of chili plants (*Capsicum annuum* L.) cv. jalapeño under hydroponic conditions

8.2.3. Abstract

The use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and beneficial elements such as silicon (Si) has gained increasing relevance in recent years as a way to promote plant growth and counteract certain types of stress. Several studies have demonstrated the synergistic effect of AMF and Si, but little research has been conducted in chili crops under hydroponic conditions. In this study, the effect on plant growth of jalapeño chili was evaluated through the application of AMF and different concentrations of silicon dioxide in irrigation water. Chili plants were established in 1-liter plastic pots containing a sterile mixture of peat moss, perlite, and vermiculite (3:2:1 v/v) as a growth medium. AMF inoculation was performed at two times: at sowing and at transplanting. At 26 days after transplanting, three Si concentrations (0, 50, and 100 g L⁻¹) were applied weekly through irrigation water. The growth medium was kept at container capacity, irrigated with deionized water, and supplemented once a week with Hoagland nutrient solution. A completely randomized design with nine treatments and ten replicates was used, with one plant per pot as the experimental unit. At 80 days after transplanting, agronomic growth variables and mycorrhizal colonization were recorded. Results showed a significant effect ($P < 0.05$) of factors and their interaction on the evaluated variables. When silicon concentration increased from 0 to 50 g L⁻¹, most evaluated variables increased. However, at the highest concentration (100 g L⁻¹), a negative effect on growth was observed regardless of AMF inoculation at sowing or transplanting. The negative effect was lower in non-mycorrhizal plants. Nevertheless, the results demonstrated a synergistic effect between AMF and Si on chili plant growth, particularly when plants were inoculated at transplanting and countered with high Si concentration.

Keywords: jalapeño pepper, SiO₂, mycorrhiza, plant growth.

8.2.4. Introducción

La sobrepoblación mundial conlleva a la alta demanda de alimentos, lo que ha motivado a la búsqueda de alternativas y prácticas agronómicas sostenibles, que permitan optimizar la productividad de los cultivos. Sin embargo, este desafío conlleva la necesidad de enfrentar los efectos del uso excesivo de agroquímicos, así como la conservación de los recursos naturales, la reducción del impacto ambiental y el establecimiento de un equilibrio en la sostenibilidad agrícola (Amanullah, 2020).

Una de las estrategias implementadas para aumentar la productividad agrícola es el empleo de microorganismos vivos, los cuales se aplican al suelo, las semillas y las plantas. Estos bioinsumos optimizan la absorción de los elementos esenciales para el desarrollo de los cultivos (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2021 y Coutiño-Puchuli *et al.*, 2023). La mayoría de estos microorganismos son benéficos y se encuentran de manera natural en el suelo y la materia vegetal, además aportan ventajas significativas como mejorar la calidad del suelo, incrementar la productividad y el rendimiento agrícola, así como reducir el uso de fertilizantes químicos y pesticidas (Evangelista & Battistoni, 2024). Esto permite obtener alimentos libres de contaminantes agroquímicos y mejorar la rentabilidad tanto de pequeños como de grandes productores (Gastélum-Martínez & Evangelista-Martínez, 2024). Los biofertilizantes comprenden microorganismos con capacidades para fijar nitrógeno y solubilizar fósforo, azufre y silicatos. Pueden encontrarse como organismos de vida libre o en formar asociaciones simbióticas en las que incluyen bacterias, hongos y micorrizas arbusculares (Nauma *et al.*, 2019). Particularmente, los HMA han demostrado un gran potencial en la agricultura debido a su capacidad de establecer asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas (Taiz *et al.*, 2023). Estas interacciones, en especial los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), se han empleado como bioprotectores, biofertilizantes y agentes de fitorremediación de metales pesados, lo que las hace altamente prometedoras para su aplicación en el sector agrícola (Delgado & Gutiérrez, 2022). Entre sus principales beneficios destacan la promoción del crecimiento vegetal, el incremento de la productividad y la mejora en la tolerancia a factores de estrés abiótico. Adicionalmente, contribuyen a mejorar la calidad del suelo, mitigar el daño por metales pesados, fortalecer la resistencia de las plantas frente a patógenos y mejorar la tolerancia al estrés causado por condiciones

climáticas extremas. También favorecen el éxito del trasplante, el crecimiento radicular y a la conservación del suelo (Mishra *et al.*, 2018 y Carrillo-Saucedo *et al.*, 2022). Además, existen estudios donde se ha demostrado que los HMA han sido eficaces en los sistemas hidropónicos (Othman *et al.*, 2024) y en su capacidad de interactuar con otros microorganismos (Schink, 2002), así como también en combinarse con ciertos elementos beneficiosos (Vega *et al.*, 2023).

Otra alternativa utilizada para estimular el crecimiento vegetal en los cultivos es el empleo de elementos benéficos o funcionales, los cuales, en ciertos casos, pueden actuar como sustitutos de los elementos esenciales, en casos cuando estos suelen ser deficientes, o bien inhiben su absorción y distribución cuando se encuentran en exceso (Kathpalia & Bhatla, 2018). Bajo condiciones específicas, estos elementos pueden ser esenciales para determinadas especies, ya que favorecen el crecimiento y desarrollo vegetal, y en activar mecanismos de respuesta ante diversos factores de estrés. Dentro de estos elementos se incluyen el sodio (Na), cobalto (Co), selenio (Se), aluminio (Al), cerio (Ce), lantano (La), titanio (Ti), vanadio (V) y silicio (Si) (Gómez-Merino *et al.*, 2015). El silicio (Si), en particular, es el segundo elemento más abundante de la corteza terrestre (Chang & Overby, 2019) y constituye una parte fundamental en las estructuras celulares de ciertos organismos, como las esponjas de mar, los radiolarios y diatomeas (Raya & Aguirre, 2012). En las plantas, el Si es asimilado en forma de ácido silícico y mediante mecanismos de absorción específicos y en la activación de genes que regulan las proteínas de las membranas plasmáticas, facilitando su transporte a la exodermis, endodermis, células corticales y parenquimatosas (Ma & Yamaji, 2015; Guo-chao *et al.*, 2018 y Mitani-Ueno & Feng, 2020). Finalmente, el Si se precipita en el interior de la planta formando fitolitos (Reven, 2003).

Las investigaciones sobre el papel del silicio en diferentes especies vegetales han llevado a la evaluación de su posible esencialidad, ya que se ha demostrado que su aplicación en los cultivos desempeña un papel clave en la protección de las plantas, la productividad agrícola y la mejora del estado nutricional de monocotiledóneas y dicotiledóneas frente a diversos tipos de estrés, tanto abióticos como bióticos. Esto representa una estrategia ecológica y sostenible para la producción agrícola (Deb & Dutta, 2022). Por otro lado, Haghighi *et al.*, (2022) evaluaron la aplicación de Si en combinación con biofertilizantes, como los hongos

micorrízicos arbusculares (HMA), bajo condiciones de estrés por sequía en *Glycyrrhiza glabra*. Los resultados indicaron efectos positivos tanto morfológico como bioquímicos. Asimismo, Das *et al.*, (2021) investigaron la interacción entre Si y la inoculación con HMA en el crecimiento, rendimiento y productividad del arroz bajo estrés por déficit hídrico, demostrando su impacto positivo en la respuesta de la planta. De manera similar, Bijalwan *et al.*, (2021) exploraron la combinación de micorrizas y silicio en el cultivo de sandía bajo condiciones de salinidad, destacando su eficacia en la mejora de la tolerancia y productividad del cultivo. Es por ello, que comprender la ecología de las plantas, así como sus simbioses y organismos antagonistas permite explorar estrategias innovadoras y sostenibles en el manejo de plagas (Frew *et al.*, (2017) e incluso mitigar los efectos de los factores ambientales.

Como se ha indicado anteriormente, la interacción entre el silicio (Si) y los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), representa una estrategia prometedora para optimizar el crecimiento y la productividad agrícola. Aunque el silicio no es considerado como un elemento esencial, se ha demostrado que desempeña un papel fundamental en la regulación del metabolismo vegetal, el refuerzo de estructuras celulares y la mejora de la resistencia de las plantas frente a factores de estrés abiótico y biótico. Por su parte, los HMA contribuyen significativamente a la absorción de nutrientes, promoviendo la formación de un sistema radicular más eficiente y fortaleciendo la capacidad de respuesta de las plantas ante condiciones ambientales adversas y ataques de patógenos. Asimismo, diversos estudios han evidenciado que la combinación de Si y HMA en los cultivos mejora la tolerancia a condiciones extremas, estimula el crecimiento vegetal y reduce la dependencia de insumos químicos agrícolas. En este contexto, el estudio de la sinergia del Si y HMA es crucial para el desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles que permitan optimizar la producción vegetal, minimizar el impacto ambiental y mejorar la rentabilidad de los sistemas agrícolas. Su aplicación conjunta representa una alternativa viable para garantizar la seguridad alimentaria y aumentar la productividad en regiones con limitaciones edáficas y climáticas.

Por ello, el presente estudio se evaluó el efecto de la micorrización y la adición de diferentes concentraciones del dióxido de silicio en el crecimiento de chile (*C. annuum*) cv. jalapeño, cultivado en condiciones hidropónicas en invernadero.

8.2.5. Metodología

8.2.5.1. Ubicación del experimento

Este trabajo se desarrolló en el laboratorio de Ecofisiología Vegetal e invernadero del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la UMSNH.

8.2.5.2. Material biológico

Se utilizaron semillas comerciales de chile cultivar jalapeño, las cuales en ensayos previos mostraron una alta tasa colonización micorrízica y presencia de arbusculos.

8.2.5.2.1. Hongo micorrízico

Se utilizó el inóculo micorrízico comercial denominado “Micorrizas”, este se adquirió en una local comercial en Morelia, Michoacán y contiene las especies *R. intraradices* y *R. Fasciculatum*.

8.2.5.3. Material químico

La fuente de silicio utilizado en este trabajo fue dióxido de Silicio (SiO₂), fue adquirido en una empresa de agroinsumos ubicada en Zapopan, Jalisco. La pureza del producto es del 99% de SiO₂, su origen es de tipo mineral de las piedras de diatomeas. Las especificaciones que indica la ficha técnica del insumo son:

- Color: blanco
- Densidad Aparente (gmL⁻¹): 0.09 – 0.12
- Densidad Compactada (gmL⁻¹): 0.13 – 0.16
- pH al 5%: 6.5 – 7.5
- Humedad máxima: 105 °C/2hrs.

8.2.5.4.Sustratos

8.2.5.4.1. Para germinación

Se utilizó una mezcla de arena roja y blanca a una proporción de 1:1 v/v, esta mezcla se esterilizó a 121 °C y a 15 lb de presión atmosférica, por 1 hora en autoclave.

8.2.5.4.2. Para trasplante

Se empleó una mezcla de sustrato estéril compuesto de peat-most, agrolita y vermiculita (3:2:1 V/V).

8.2.5.5.Establecimiento del experimento

Primero las semillas de chile jalapeño se germinaron, para esto se enjuagaron con agua corriente y se dejaron en hipoclorito de sodio (cloro comercial) al 5% durante cinco minutos; transcurrido el tiempo se empleó un colador de plástico para recolectar las semillas y se enjuagaron con abundante agua desionizada para eliminar los residuos restantes de cloro. Por último, se dejaron las semillas en una superficie absorbente y extendidas hasta su siembra según Izquierdo y Granados (2011). La siembra se realizó en charolas de aluminio con dimensiones de 33 X 26.8 X 6.3 cm, las cuales contenían el sustrato suficiente para formar una capa de 5 cm de espesor. Se dispusieron dos charolas de germinación en la cual, a una de ellas, se le adicionó al momento de la siembra 12 g del inóculo comercial de micorrizas (aproximadamente 480 esporas y propágulos de micorriza). Una vez colocadas las semillas en ambas charolas, se cubrieron con el sustrato de germinación y se cubrieron con plástico. En todo momento el sustrato de las charolas se mantuvo a capacidad de contenedor con agua desionizada para favorecer la germinación. Las charolas fueron colocadas entre febrero y marzo del 2024, se mantuvieron en condiciones ambientales con una temperatura entre 15 a 30 °C (Weather Spark, 2024), para asegurar su protección, se ubicaron bajo techo y sobre una

mesa dentro del laboratorio de Ecofisiología Vegetal del IIAF, hasta el establecimiento del ensayo.

8.2.5.5.1. Trasplante

A los 31 días después de la siembra (dds), cuando las plántulas tenían una altura uniforme y cuatro hojas verdaderas, se trasplantaron a macetas negras de 500 mL, se utilizó el sustrato de trasplante previamente descrito. Al momento del trasplante se realizó una aplicación de inóculo de HMA en aquellas plantas que no fueron inoculadas desde la siembra. Para esto se utilizaron 240 mg del inóculo anteriormente mencionado, aplicándolo directamente a la raíz de la plántula de modo que quedara totalmente adherido a la raíz, el inóculo restante se adicionó al orificio del trasplante.

8.2.5.6. Tratamientos y diseño experimental

Para evaluar el efecto individual y combinado de la micorrización y el dióxido de silicio en el crecimiento del chile, se establecieron dos factores de estudio y cada uno conformado con tres niveles. Los tratamientos se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Diseño experimental, organizado por factores, niveles y tratamientos.

Factores	Niveles	Tratamientos
Micorrización	Sin Micorriza (SM)	T1= SM_0 gL ⁻¹
		T2= MS_0 gL ⁻¹
	Micorriza Siembra (MS)	T3=MT_0 gL ⁻¹
		T4=SM_50 gL ⁻¹
	Micorriza Trasplante (MT)	T5=MS_50 gL ⁻¹
Concentración de SiO ₂	0 gL ⁻¹	T6=MT_50 gL ⁻¹
	50 gL ⁻¹	T7=SM_100 gL ⁻¹
		T8=MS_100 gL ⁻¹
	100 gL ⁻¹	T9=MT_100 gL ⁻¹

Cada tratamiento se repitió 10 veces y se establecieron un total de 90 macetas. La unidad experimental consistió en una maceta con una planta. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar.

8.2.5.7. Condiciones y manejo del experimento

El experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero. Todas las macetas fueron regadas diariamente con agua desionizada hasta alcanzar la capacidad del contenedor. A los 28 días después del establecimiento de las plantas, se aplicó el SiO₂, previamente disuelto en agua de riego según la concentración de los tratamientos. Se administraron 100 mL a cada repetición y se aplicaron directamente en la maceta una vez por semana hasta el final del experimento. Para garantizar una adecuada nutrición de las plantas, se realizó fertirrigación semanal con 100 mL de solución nutritiva de Hoagland. La composición química de la solución nutritiva fue la siguiente (por litro): KNO₃ (30 mL); Ca(NO₃)₂ (20 mL); MgSO₄ (5 mL); micronutrientes (H₃BO₃; ZnSO₄; CuSO₄; (NH₄)₂MoO₄) (5 mL); Fe EDTA (5 mL) y 50% de K₃PO₄ (5 mL). La solución nutritiva fue preparada con sales grado reactivo y agua desionizada, se aplicó dos días antes de la aplicación del SiO₂.

8.2.5.8. Muestreos y variables evaluadas

A partir de los 26 ddt, se iniciaron las mediciones de variables no destructivas cada semana, las cuales fueron: altura de planta (AP), medida con una regla graduada de 30 cm, se tomó como referencia el sustrato de la maceta hasta el ápice del tallo (Ritchie *et al.*, 2004); diámetro de tallo (DT), es considerado como el mejor predictor del desempeño del cultivo y la calidad de la planta, fue medido con un vernier digital graduado en milímetros (mm) a la altura del cuello de la raíz, donde el tallo se conecta con el sistema radical (Ritchie *et al.*, 2004); número de hojas (NH), fue determinado mediante conteo visual de hojas verdaderas y se descartaron hojas secas; número de botones (NB) y número de flores (NF), fueron registrados visualmente.

Se realizaron dos muestreos destructivos a los 80 y 92 ddt, donde se registró la longitud de raíz (LR), se realizó de manera manual con una regla graduada en cm; el volumen de raíz (VR), se determinó utilizando el método de desplazamiento de agua; el peso fresco y seco de la parte aérea (PFPA, PSPA) y peso fresco y seco de la raíz (PFR, PSR), se determinaron utilizando una balanza de precisión (Mettler Toledo PR8002) y los resultados fueron

registrados en gramos (g). Para el peso seco, las muestras se secaron en una estufa a 50 °C durante cuatro días o hasta alcanzar un peso constante. Además, se registró el área foliar (AF), utilizando un medidor de área foliar LI-3100C.

Se determinó el porcentaje de colonización micorrízica (%PCM) previo a la aplicación del SiO₂ y al final del experimento; para esto se recolectaron muestras de raíces de las plantas de chile jalapeño conforme al protocolo propuesto por Suárez *et al.*, (2022). A las muestras se les realizó un clareado y tinción de acuerdo con lo descrito por Phillips y Hayman (1970). Por último, el cálculo de %PCM se realizó siguiendo la metodología de McGonigle *et al.*, (1990).

8.2.5.9. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron procesados en el paquete Excel donde se elaboraron las bases de datos y posteriormente fueron exportadas al paquete estadístico SAS, donde se analizaron estadísticamente. Los datos fueron normalizados para cumplir los criterios de normalidad y homogeneidad de varianza y posteriormente se analizaron mediante un análisis de varianza multifactorial (ANOVA) de dos factores y pruebas de comparación de medias con la prueba de Tukey. Ambos con una $P < 0.05$.

8.2.6. Resultados

8.2.6.1. Efecto de la micorrización, dióxido de silicio y su interacción en variables no destructivas en chile jalapeño

El análisis de varianza factorial de la dinámica de las variables altura, diámetro del tallo, número de hojas, número de botones y número de flores mostró efecto significativo de los factores y su interacción ($P < 0.05$), pero solo en determinadas fechas de muestreo (Fig. 6 y 7, Tabla 4). El análisis por factor micorrización reveló que la variable altura no registró diferencias significativas a lo largo del experimento, excepto en los 26 ddt. Sin embargo, la altura de la planta presentó un incremento constante durante el tiempo alcanzando las plantas en promedio 17 cm a los 90 ddt (Fig. 6a). Para la variable diámetro de tallo, se presentaron diferencias significativas a partir de los 55 ddt y se mantuvieron hasta el final del experimento. En esta variable se encontró que las plantas micorrizadas al trasplante (MT) presentaron un incremento de 0.50 mm diámetro del tallo a diferencia de las plantas de chile que fueron micorrizadas a la siembra (MS) y de las que no fueron micorrizadas (SM) (Fig. 6b). Para el número de hojas, se presentaron diferencias significativas por la micorrización desde los 26 ddt y hasta el final del experimento, en donde las plantas que se micorrizaron al trasplante (MT) y sin micorriza (SM) presentaron la mayor cantidad de hojas, por lo que, resultaron estadísticamente iguales entre sí y diferentes a las plantas que se micorrizaron a la siembra (MS). En general la cantidad de hojas que produjeron los niveles del factor micorrización se incrementó durante el tiempo y en promedio las plantas micorrizadas al trasplante (MT) y sin micorrización (SM), alcanzaron en promedio de 33 hojas por planta siendo estadísticamente distinto a las 26 hojas que alcanzaron las plantas micorrizadas desde la siembra (MS) (Fig. 6c). Respecto al número de botones, los cuales se registraron a partir de los 47 ddt solo se encontraron diferencias significativas por la micorrización al trasplante (MT) a partir de los 69 y 90 ddt. Al igual que lo observado en el número de hojas, las plantas que fueron micorrizadas a la siembra (MS), registraron la menor cantidad de botones durante la fase de inducción y diferenciación floral, en contraste, las plantas micorrizadas al momento del trasplante (MT) y sin micorrizar (SM) resultaron tener la misma producción de botones durante y al final del experimento, en promedio presentaron 10 botones por planta, siendo el doble a lo alcanzado en las plantas micorrizadas desde la siembra (MS) (Fig. 6d). Finalmente,

a los 62 ddt se registró el inicio de la fase de floración y el análisis estadístico no registró diferencias significativas por efecto de la micorrización durante el tiempo que duró el experimento y en promedio a los 90 ddt presentaron dos flores completamente abiertas por planta (Fig. 6e).

El análisis de las variables anteriormente mencionadas, indica que para este trabajo de estudio la micorrización y el momento en que se aplica la micorriza comercial influyen en el crecimiento de las plantas de chile jalapeño, algunas variables como el número de hojas, botones y diámetro del tallo mostraron un efecto positivo y potencializador en su desarrollo. Sin embargo, otras variables como la altura y el número de flores no afectaron su desarrollo.

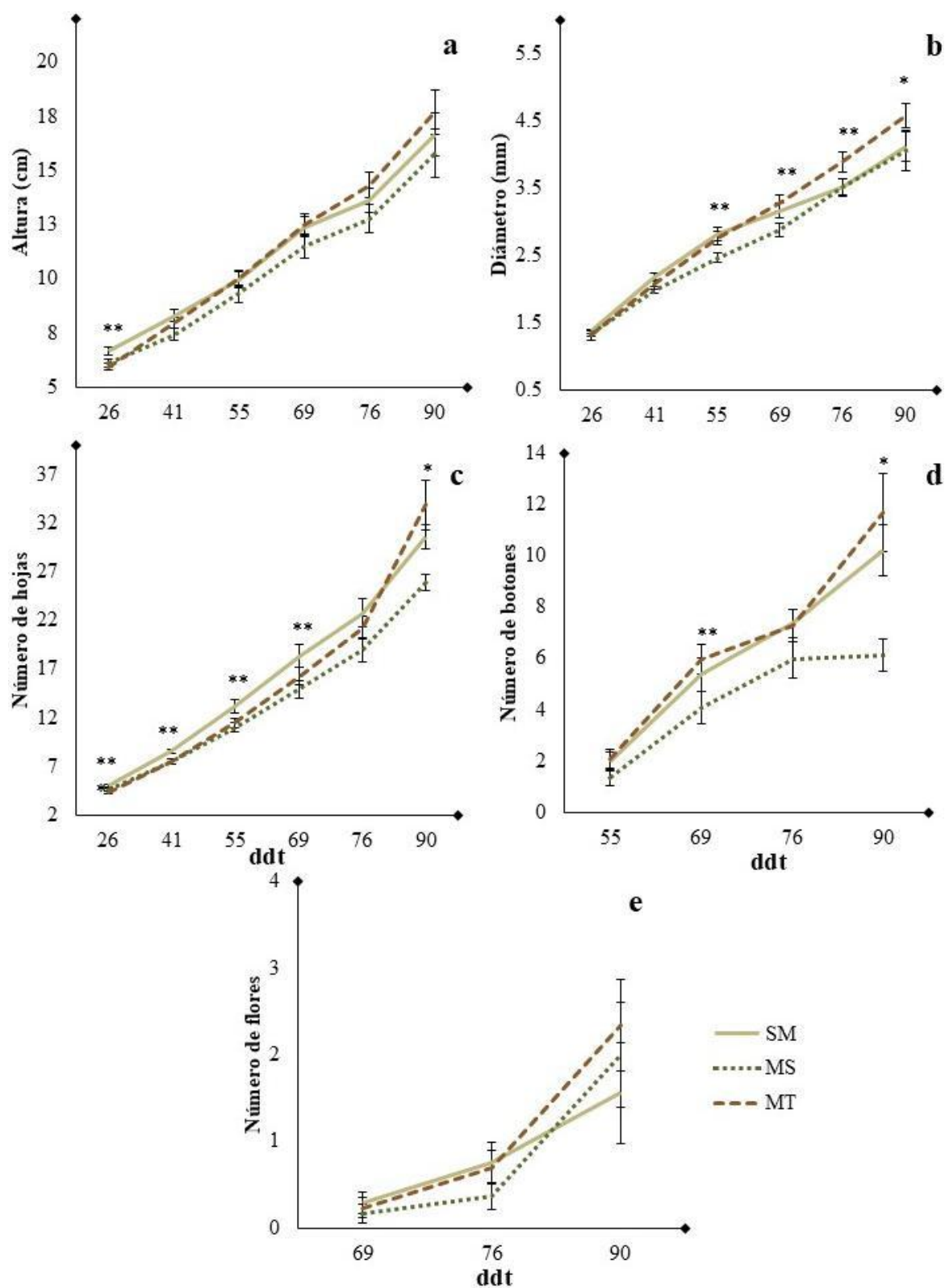


Figura 6. Efecto de la micorrización sobre las variables de crecimiento acumulado en plantas de chile jalapeño. Las líneas sobre las medias representan el error estándar. * indica una diferencia significativa ($P < 0.05$) del factor en la fecha de medición.

De igual modo que en el factor micorrización se presentaron diferencias significativas en el efecto del factor concentración de SiO₂ sobre cada variable no destructiva y a lo largo del tiempo de medición (Fig. 7a-e). En todas las variables evaluadas la concentración de 50 gL⁻¹, fue donde se alcanzaron los máximos valores. En particular para la variable altura de la planta, las diferencias entre tratamientos se presentaron solo a los 55, 69 y 76 ddt, siendo la concentración de 50 gL⁻¹, donde se registró la mayor altura durante todo el experimento. Al final del experimento, se registró una altura promedio de 17 cm en las plantas regadas con 50 gL⁻¹ y sin SiO₂, ambos niveles resultaron ser estadísticamente iguales y en promedio incrementaron 2 cm de altura a diferencia de la máxima concentración de SiO₂ utilizada en las plantas de chile jalapeño (Fig. 7a). En el diámetro de tallo desde los 26 ddt, en las plantas con 50 gL⁻¹ hubo un incremento significativo de 0.91 mm más que lo alcanzado por las plantas regadas con 0 y 100 gL⁻¹ de SiO₂, siendo estadísticamente diferentes (Fig. 7b). De igual manera que en las variables anteriores, la concentración de 50 gL⁻¹ de SiO₂ mostró tener mayor producción de número de hojas respecto a las otras concentraciones; sin embargo, resultó significativa a los 55, 69 y 76 ddt. Al final del experimento todas las plantas en promedio produjeron 30 hojas (Fig. 7c). Para el número de botones por planta, nuevamente la concentración de 50 gL⁻¹ presentó tener mayor formación de botones florales y resultó estadísticamente diferente a 0 y 100 gL⁻¹ solo a los 55, 69 y 76 ddt. A su vez, la concentración más alta de SiO₂ influyó en formar una menor cantidad de botones; aunque al final del experimento todas las plantas tuvieron en promedio nueve botones (Fig. 7d). Finalmente, para el número de flores se encontró que con 50 gL⁻¹ de SiO₂ se alcanzó la mayor cantidad de flores abiertas completamente, siendo estadísticamente diferente a las otras dos concentraciones aplicadas. Al final el experimento, esta concentración intermedia obtuvo en promedio tres flores abiertas por planta, siendo dos veces más a lo alcanzado con la concentración de 0 y 100 L⁻¹ de SiO₂. Al igual que en la variable anterior, la concentración alta de SiO₂ se presentó la menor antesis (Fig. 7e).

Los resultados sugieren que la aplicación de 100 gL⁻¹ de SiO₂, podría afectar negativamente el desarrollo del cultivo del chile jalapeño, mientras que a 50 gL⁻¹ favorece su crecimiento.

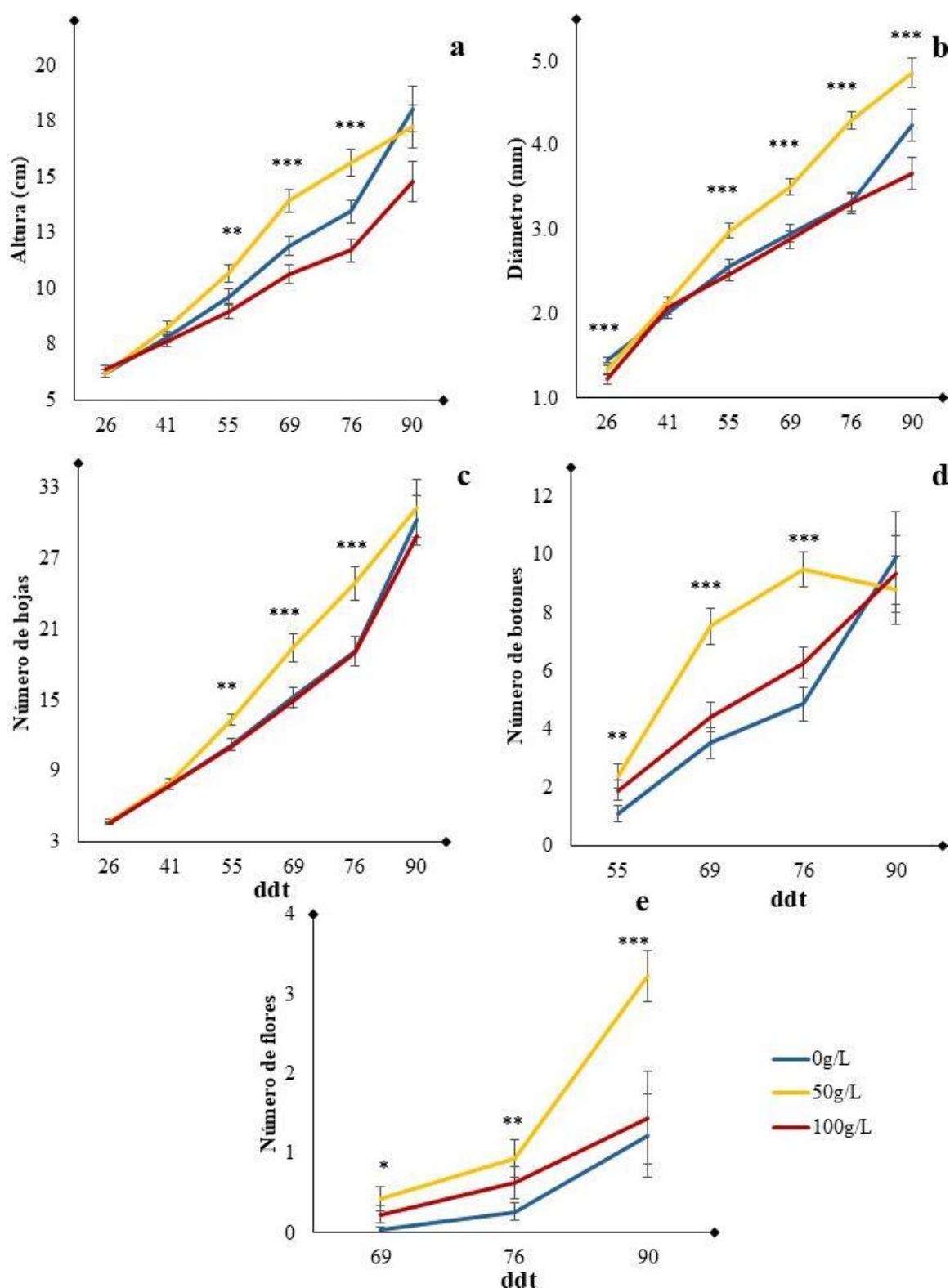


Figura 7. Efecto de la concentración de SiO₂ sobre las variables de crecimiento acumulado en plantas de chile jalapeño. Las líneas sobre las medias representan el error estándar. * indica una diferencia significativa ($P < 0.05$) del factor en la fecha de medición.

Cuando se analizó la interacción entre los factores estudiados en las variables no destructivas durante el tiempo que permaneció el experimento, se encontraron en los tratamientos efectos significativos en todas las variables evaluadas y en las diferentes fechas de medición, excepto a los 41 ddt donde los tratamientos no registraron diferencias significativas tanto en las variables de altura de la planta, diámetro del tallo y en el número de hojas (Tabla 4). Sin embargo, la presencia de botones comenzó a observarse a los 47 ddt y se registraron diferencias significativas en la interacción, pero no a los 62, 69, 76 y 90 ddt. Mismo comportamiento se observó en la cantidad de flores solo que su aparición fue hasta los 62 ddt, aun así, no se registraron diferencias significativas entre la interacción de los factores, solo hasta los 76 ddt, la cual se mantuvo hasta el final del experimento. En general los datos mostraron que a concentraciones de silicio de 50 gL⁻¹, se presentaron los valores superiores de las variables evaluadas durante el tiempo que duró el experimento independientemente si las plantas tuvieran o no HMA; por el contrario, cuando se les adicionó a las plantas la concentración más alta de dióxido de silicio, en general se observó una disminución significativa de los valores de las variables evaluadas. Por otra parte, no se observó efecto significativo del tiempo de aplicación de los HMA comercial, ya sea desde la siembra o al momento del trasplante, al registrarse valores similares en las variables evaluadas. Lo cual indicaría que el factor que más influye en la respuesta de las variables evaluadas durante el tiempo del experimento con el cultivar jalapeño es el dióxido de silicio.

Tabla 4. Interacción entre los factores micorrización y las concentraciones de SiO₂ en las variables agronómicas del cultivar jalapeño. Se presenta el efecto combinado de la micorrización y las tres concentraciones de SiO₂ sobre las variables morfológicas y reproductivas del cultivar jalapeño, evaluadas a diferentes fechas después del trasplante (ddt). Para cada fecha se muestran las medias correspondientes y son indicadas con letras, las cuales, indican que letras iguales no existen diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

ddt	Tratamientos	AP (cm)	DT (mm)	NH	NB	NF
26	HMA*SiO₂ (gL⁻¹)	0.13	0.00	0.12		
	SM*0	6.65 ab	1.34 ab	5.30 a		
	SM*50	6.14 ab	1.32 ab	4.90 ab		
	SM*100	7.22 a	1.44 ab	4.90 ab		
	MS*0	6.09 ab	1.45 ab	4.10 b		
	MS*50	6.19 ab	1.24 b	4.90 ab		
	MS*100	6.00 ab	1.32 ab	4.60 ab		
	MT*0	5.80 b	1.57 ab	4.30 ab		
	MT*50	6.17 ab	1.45 ab	4.40 ab		
	MT*100	5.82 b	0.9 c	4.20 b		
41	HMA*SiO₂ (gL⁻¹)	0.59	0.95	0.93		
	SM*0	8.28 a	2.11 a	8.50 a		
	SM*50	8.23 a	2.20 a	8.60 a		
	SM*100	8.37 a	2.20 a	8.50 a		
	MS*0	7.60 a	1.88 a	7.50 a		
	MS*50	7.82 a	2.10 a	7.80 a		
	MS*100	6.81 a	1.96 a	7.20 a		
	MT*0	7.55 a	2.03 a	7.20 a		
	MT*50	8.55 a	2.13 a	7.70 a		
	MT*100	7.72 a	2.04 a	7.60 a		
55	HMA*SiO₂ (gL⁻¹)	0.71	0.45	0.77	0.05	
	SM*0	10.2 a	2.57 bc	12.80 ab	1.00 a	
	SM*50	10.7 a	3.26 a	15.10 a	3.10 a	
	SM*100	8.93 a	2.63 abc	11.60 ab	1.80 a	
	MS*0	9.32 a	2.43 bc	10.20 b	0.90 a	
	MS*50	10.3 a	2.77 abc	12.40 ab	2.50 a	
	MS*100	8.35 a	2.19 c	10.30 b	0.70 a	
	MT*0	9.28 a	2.71 abc	10.60 b	1.40 a	
	MT*50	11.1 a	2.93 ab	12.40 ab	1.60 a	

69	MT*100	9.64	a	2.61	bc	11.40	ab	3.20	a
	HMA*SiO₂ (g L⁻¹)	0.69		0.41		0.26		0.31	0.20
	SM*0	12.9	ab	3.10	abc	17.90	ab	4.40	abcd
	SM*50	14.3	a	3.66	a	23.25	a	8.25	a
	SM*100	10.4	b	2.82	bcd	14.80	b	4.00	bcd
	MS*0	11.2	ab	2.69	cd	13.20	b	2.40	d
	MS*50	13.3	ab	3.37	abc	18.00	ab	7.00	abc
	MS*100	10	b	2.57	bcd	13.50	b	2.80	cd
	MT*0	11.6	ab	3.07	abcd	14.60	b	3.80	bcd
	MT*50	14.3	a	3.52	ab	17.80	ab	7.50	ab
76	MT*100	11.5	ab	3.25	abcd	16.40	ab	6.50	abcd
	HMA*SiO₂ (g L⁻¹)	0.75		0.20		0.34		0.35	0.00
	SM*0	14.2	abc	3.45	bcd	22.80	ab	5.80	ab
	SM*50	15.4	ab	4.09	abc	27.78	a	9.44	a
	SM*100	11.4	bc	3.06	c	18.10	ab	7.00	ab
	MS*0	12.8	abc	3.17	c	15.90	b	4.10	b
	MS*50	14.7	abc	4.27	ab	22.80	ab	9.50	a
	MS*100	10.9	c	3.08	abcd	18.00	b	4.20	b
	MT*0	13.4	abc	3.37	cd	17.40	b	4.70	b
	MT*50	16.7	a	4.51	a	24.30	ab	9.50	a
	MT*100	12.9	abc	3.79	c	21.00	ab	7.60	ab

Remarcado: verde indica valores altos y rojo bajos.

8.2.6.2. Efecto de la micorrización, concentraciones de dióxido de silicio y su interacción en las variables destructivas del cultivar jalapeño

El muestreo destructivo de los parámetros agronómicos del crecimiento y variables reproductivas de plantas de chile jalapeño realizado a los 80 ddt, mostró un efecto estadísticamente significativo en el factor micorrización, concentración de SiO₂ y su interacción, para la mayoría de las variables evaluadas (Tabla 5).

Tabla 5. Efecto de los factores evaluados sobre variables agronómicas evaluado a los 80 ddt.

Factor	Nivel	Variables																	
		AP		DT		PFPA		PSPA		PFR		PSR		NH		NB		NF	
		cm		mm		g		g		g		g							
Micorrización (M)	SM	14.7	a	4.0	a	5.1	a	0.9	a	3.8	a	0.2	a	23.5	a	8	a	1	a
	MS	13.1	a	3.5	a	3.0	b	0.5	b	2.1	b	0.1	b	18.9	a	6	a	1	a
	MT	15.2	a	4.0	a	4.5	a	0.8	ab	3.8	a	0.2	a	20.3	a	7	a	1	a
Concentración de SiO ₂ (gL ⁻¹)	0	13.2	b	3.3	b	3.0	b	0.6	b	2.1	b	0.1	b	18.2	b	5	b	1	b
	50	17.2	a	4.5	a	6.0	a	1.1	a	4.3	a	0.3	a	25.9	a	10	a	2	a
	100	12.6	b	3.6	b	3.6	b	0.6	b	3.1	b	0.2	b	18.5	b	6	b	1	b
M x SiO ₂ (gL ⁻¹)	SM*0	13.9	a	3.5	abc	3.6	bc	0.7	bc	2.1	bc	0.2	abc	22.0	ab	5	abc	1	c
	SM*50	17.8	a	4.8	a	8.1	a	1.5	a	5.8	a	0.3	a	31.3	a	10	a	3	a
	SM*100	12.3	bc	3.6	abc	3.7	bc	0.6	bc	3.4	abc	0.2	abc	17.2	b	7	abc	0	c
	MS*0	12.3	bc	3.2	c	2.3	c	0.4	c	1.7	c	0.1	bc	15.5	b	4	c	0	c
	MS*50	15.7	ab	4.2	abc	4.3	bc	0.8	bc	2.6	bc	0.1	bc	24.0	ab	10	a	1	bc
	MS*100	11.5	c	3.1	c	2.5	c	0.4	c	1.9	c	0.1	c	17.1	b	4	c	1	bc
	MT*0	13.6	abc	3.3	bc	3.2	bc	0.6	bc	2.6	bc	0.2	abc	17.1	b	4	bc	1	bc
	MT*50	18.3	a	4.6	ab	5.7	ab	1.0	ab	4.7	ab	0.3	ab	23.1	ab	10	ab	1	bc
	MT* 100	13.7	abc	4.1	abc	4.5	bc	0.7	bc	3.9	abc	0.2	abc	20.7	ab	8	abc	2	ab

Acrónimos: AP: altura de la planta; DT: diámetro del tallo; PFFA: peso fresco de la parte aérea; PSPA: peso seco de la parte aérea; PFR: peso fresco de la raíz; PSR: peso seco de la raíz; NH: número de hojas; NB: número de botones; NF: número de flores. Las medias con letras iguales, indican que son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$), muestra n=63.

El efecto del factor micorrización en las variables como altura, diámetro, número de hojas, número de botones y número de flores, resultó no significativo y en promedio las plantas tuvieron alrededor de 14 cm, 3.8 mm, 21, 7 y 1 respectivamente. Para las variables de peso

fresco y seco de la parte aérea y raíz, los resultados indicaron que cuando la micorrización se realiza desde la siembra (MS) los valores disminuyen entre 1.5 a 2 veces su valor comparado con aquellas plantas de chile micorrizadas al trasplante (MT) y sin micorriza (SM), las cuales presentaron los valores más altos, resultando significativo esta disminución (Tabla 5). Las variables de longitud de raíz (LR), volumen de raíz (VR), área foliar (AF) y peso seco total (PST), se muestran en la (Fig. 8a-d). En todas ellas se encontraron diferencias estadísticas significativas para el factor micorrización ($P < 0.05$); al igual que en las variables anteriores la generalidad fue que cuando la micorrización se realiza al momento de la siembra (MS) los valores disminuyeron. Para el PST, las plantas sin micorriza (SM) y micorrizadas al trasplante (MT), resultaron estadísticamente iguales y en promedio obtuvieron 1.2 g, siendo 0.5 g mayor a lo registrado en las plantas micorrizadas a la siembra (MS) (Fig. 8d). Mismo comportamiento presentaron las variables LR, VR y AF (Fig. 8a, b, c), donde se registraron los menores valores en las plantas donde se micorrizó en la siembra (MS). Las plantas sin micorriza (SM) y las micorrizadas al trasplante (MT) presentaron valores estadísticamente iguales y superiores en promedio un 25% más que en las plantas micorrizadas al momento de la siembra (MS).

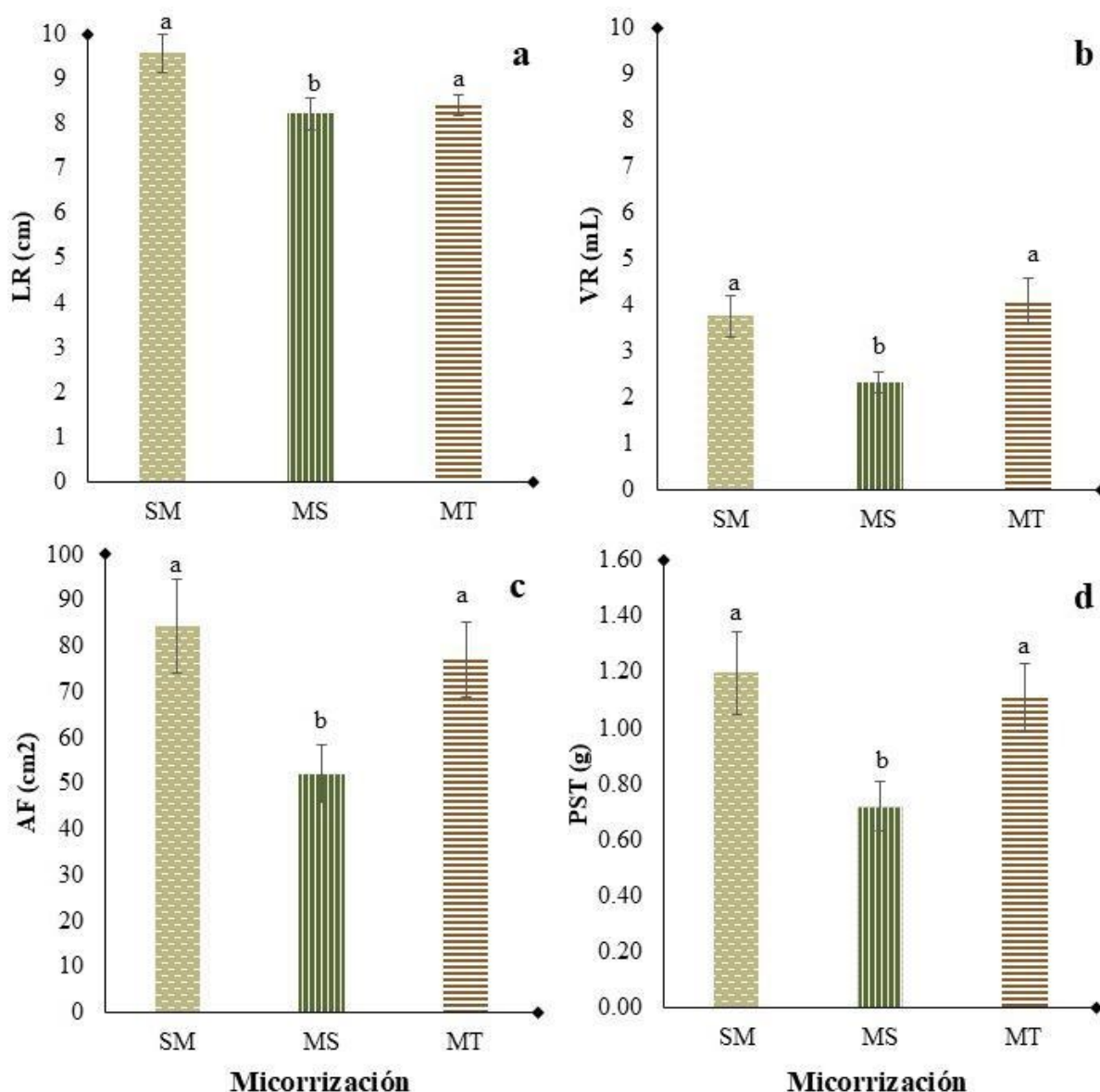


Figura 8. Efecto del factor micorrización en las variables de crecimiento a los 80 ddt. LR, longitud de raíz (a); VR, volumen de raíz (b); AF, área foliar (c); PST, peso seco total (d). Barras con letras distintas indican diferencia significativa (Tukey, $P < 0.05$).

Al realizar el análisis por efecto de la concentración de dióxido de silicio en el cultivar jalapeño resultó que en la mayoría de las variables realizadas en el muestreo a los 80 ddt resultaron ser significativas (Tabla 5). Lo cual indica que la concentración de 50 gL⁻¹, presentó mayores incrementos en los valores de crecimiento y por consiguiente fue estadísticamente diferente a las concentraciones de 0 y 100 gL⁻¹, las cuales, estas resultaron iguales estadísticamente. De tal manera se tiene que a la concentración de 50 gL⁻¹ incrementó

la altura de la planta a 4 cm más a diferencia de las otras concentraciones y en el caso del diámetro del tallo el aumento fue de 1.1 mm. En cambio, el peso fresco de la parte aérea, raíz, así como el peso seco de la parte aérea y raíz, resultó aproximadamente el doble a lo obtenido en las plantas sin SiO₂ y la concentración más alta de SiO₂. Del mismo modo, el número de hojas fue de ocho hojas más. Sin embargo, para las variables reproductivas, ocurrió el mismo resultado siendo el incremento de número de botones y número de flores de unidades en la concentración de 50 gL⁻¹, del doble respecto a 0 y 100 gL⁻¹ (Tabla 5).

En la Fig. 9(a-d), se muestran los resultados del efecto de las concentraciones de SiO₂ en las variables de longitud de raíz (LR), volumen de raíz (VR), área foliar (AF) y peso seco total (PST). Los datos presentan la misma tendencia que las variables anteriormente descritas. Para la longitud de raíz, los resultados mostraron que plantas con la concentración de 0 y 100 gL⁻¹, fueron estadísticamente iguales. La mayor longitud de la raíz se encontró en plantas irrigadas con la concentración de 50 gL⁻¹, la cual incrementó en 0.6 cm, siendo esta diferencia estadísticamente diferente (Fig. 9a). Similares resultados se registraron para el volumen de raíz, donde el incremento promedio fue de 1.5 mL en plantas irrigadas con 50 gL⁻¹, siendo nuevamente estadísticamente diferente a lo obtenido en las plantas irrigadas con las concentraciones de 0 y 100 gL⁻¹ (Fig. 9b). Para el área foliar nuevamente se mantiene la tendencia encontrada entre las concentraciones, sin embargo, la magnitud del incremento es mucho mayor para esta variable, teniendo un 40% más área foliar las plantas irrigadas con la concentración de 50 gL⁻¹, respecto a las otras dos concentraciones evaluadas (Fig. 9c). Finalmente, para el peso seco total, el incremento de peso fue del 100% en aquellas plantas con la concentración de 50 gL⁻¹, respecto a 0 y 100 gL⁻¹ (Fig. 9d).

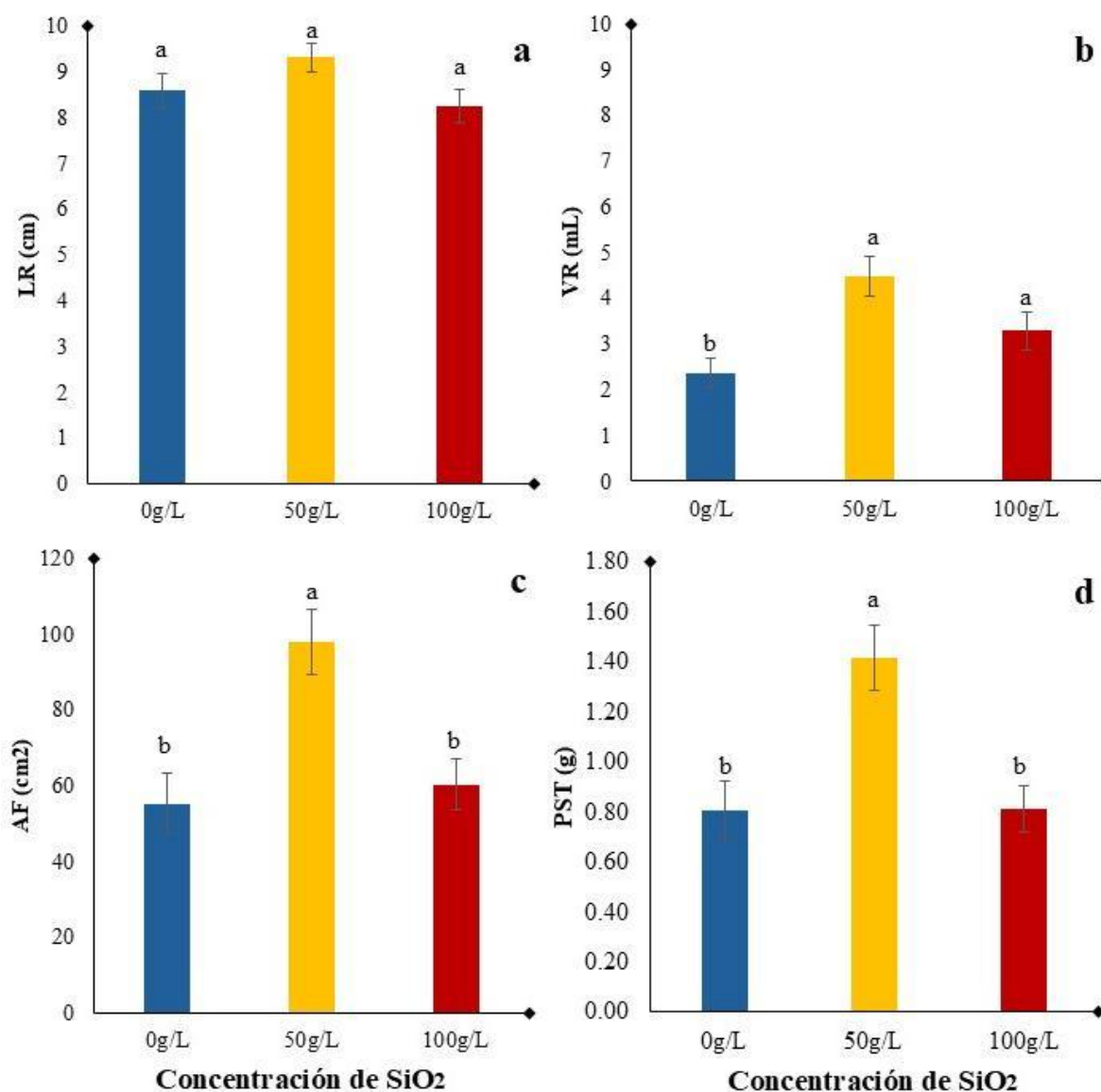


Figura 9. Efecto de la concentración de silicio, en variables de crecimiento a los 80 ddt. LR, longitud de raíz (a); VR, volumen de raíz (b); AF, área foliar (c); PST, peso seco total (d). Barras con letras distintas indican diferencia significativa (Tukey, $P<0.05$).

El efecto de la interacción de los factores estudiados (Micorrización x SiO₂), resultó significativa para todas las variables evaluadas (Tabla 5). La generalidad encontrada es que las variables respuesta, registraron los mayores valores en la concentración de 50 gL⁻¹, y su valor no se vio afectado por la micorrización, pues estadísticamente resultó igual estuvieran o no micorrizadas. En todos los casos se observó que, al pasar de 0 a 50 gL⁻¹ de concentración de dióxido de silicio se incrementan significativamente los valores para la mayoría de las

variables evaluadas (Tabla 5, Fig. 10 a-d), pero al pasar de 50 a 100 gL⁻¹, se registran una disminución significativa del valor de las variables; sin embargo, cuando las plantas se encuentran micorrizadas esta disminución no llega a ser tan abrupta e inclusive en algunas variables se registran los mismos valores que se alcanzan con la concentración de 50 gL⁻¹. Lo que sugiere que la micorrización ya sea a la siembra o al momento del trasplante, contrarresta el efecto negativo que pudiera estar ocasionando la concentración más alta de silicio.

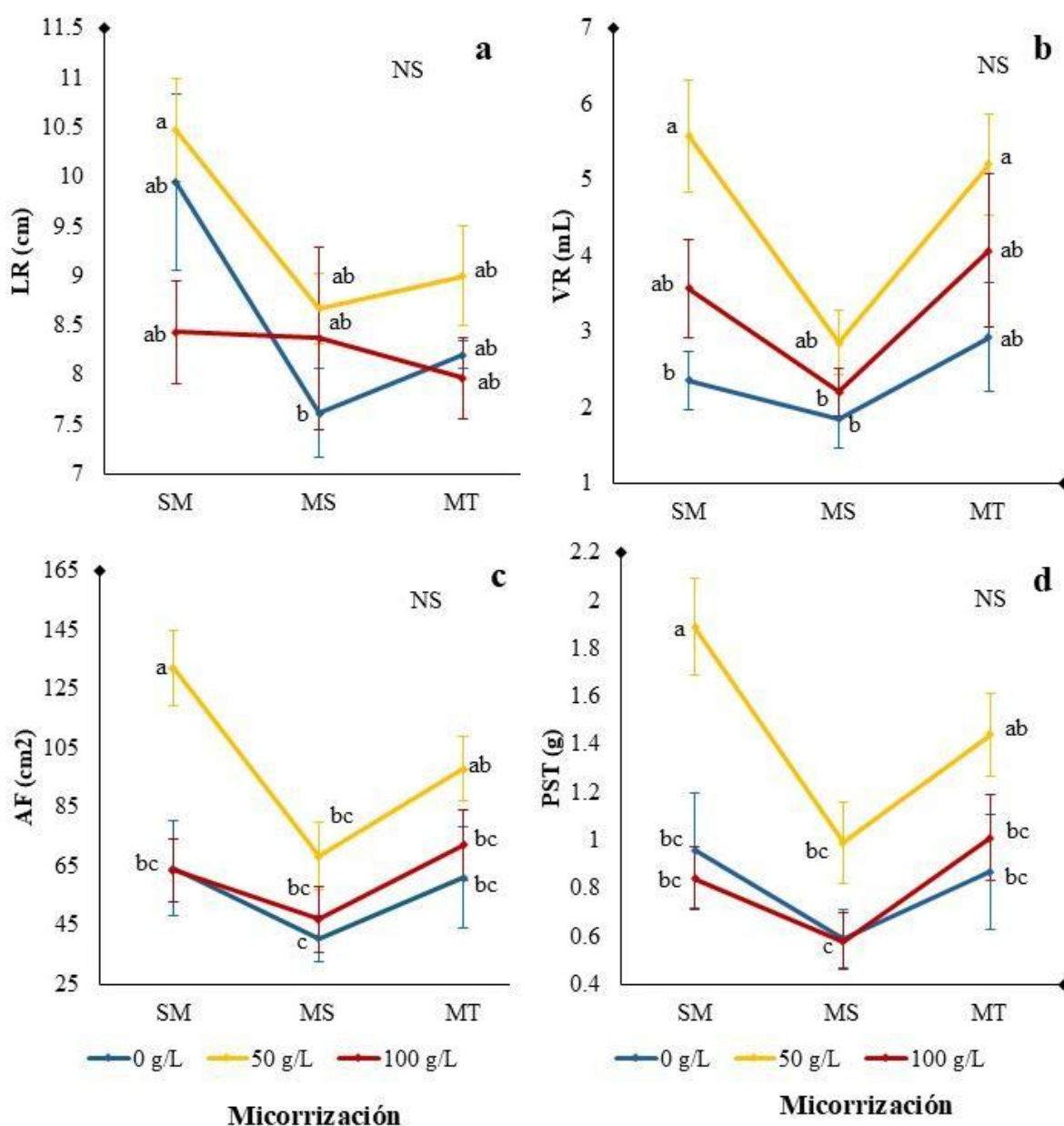


Figura 10. Efecto de la interacción por micorrización y concentraciones de SiO₂ en las

variables no destructivas del cultivar jalapeño. LR, longitud de raíz (a); VR, volumen de raíz (v); AF, área foliar (c); PST, peso seco total (d).

8.2.6.3. Análisis del porcentaje de colonización micorrízica

En la Fig. 11, se presentan los porcentajes de colonización micorrízica en las plantas de chile jalapeño previo al inicio de la aplicación de las distintas concentraciones de dióxido de silicio en el riego. Se registró en promedio una colonización micorrízica del 85%, independientemente del momento en que se haya inoculado la micorriza comercial, lo cual demuestra una alta afinidad del cultivar jalapeño a la micorrización. Al inicio de la aplicación del SiO₂, todas las plantas micorrizadas tenían el mismo nivel de colonización, sin embargo, al finalizar el experimento, la colonización en estas plantas disminuyó en un 73%.

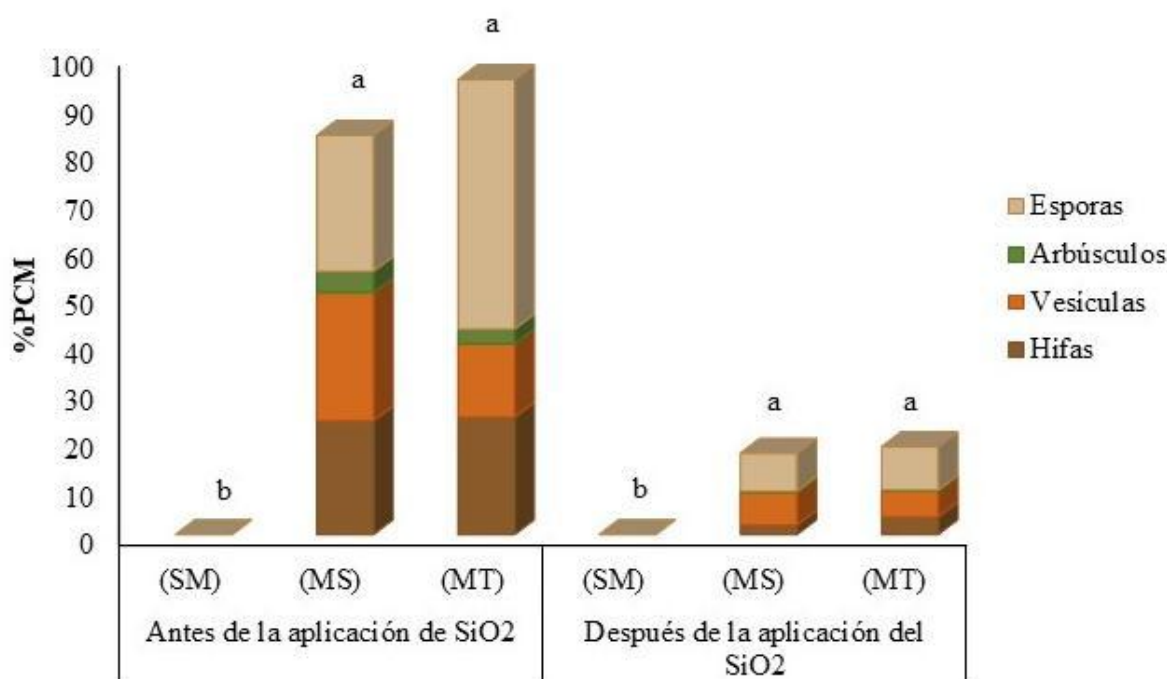


Figura 11. Colonización micorrízica en plantas de chile jalapeño, previo y posterior a la aplicación de dióxido de silicio en el agua de riego. Letras distintas en barras, indican diferencia significativa (Tukey, $P < 0.05$), la comparación se realizó separando antes y después de la aplicación del SiO₂.

Al analizar los valores de colonización micorrízica al final del experimento, por efecto a las distintas aplicaciones de SiO₂ se encontró que, en la concentración de 50 gL⁻¹, se registró el menor porcentaje (5.6%), siendo significativamente menor (aproximadamente 50%), a lo registrado en las concentraciones de 0 y 100 gL⁻¹. Estos resultados, no fueron afectados por el momento de colonización micorrízica, ya que presentaron la misma colonización (Fig. 12).

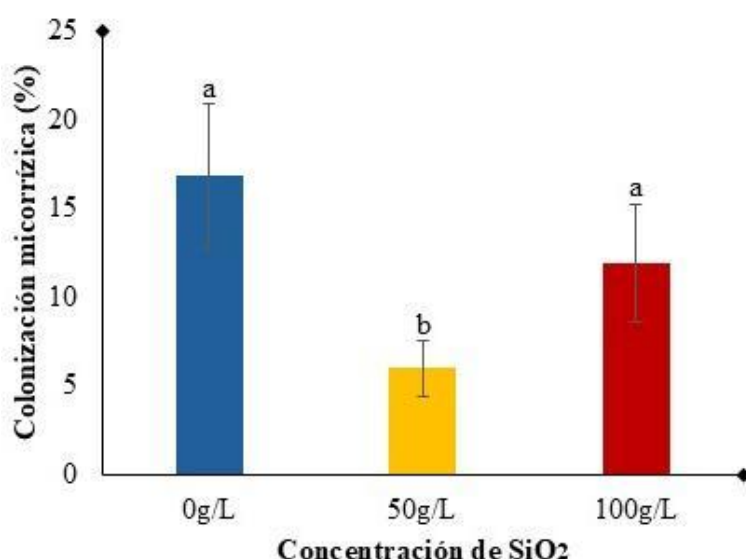


Figura 12. Efecto de la concentración de SiO₂ en la colonización micorrízica a los 80 ddt. Letras distintas en barras, indican diferencia significativa (Tukey, $P < 0.05$).

Al evaluar la interacción entre la micorrización y concentraciones de silicio, se mantuvo la tendencia anteriormente observada, una disminución en la colonización micorrízica en la concentración de 50 gL⁻¹ y valores estadísticamente iguales en las concentraciones de 0 y 100 gL⁻¹ (Fig. 13).

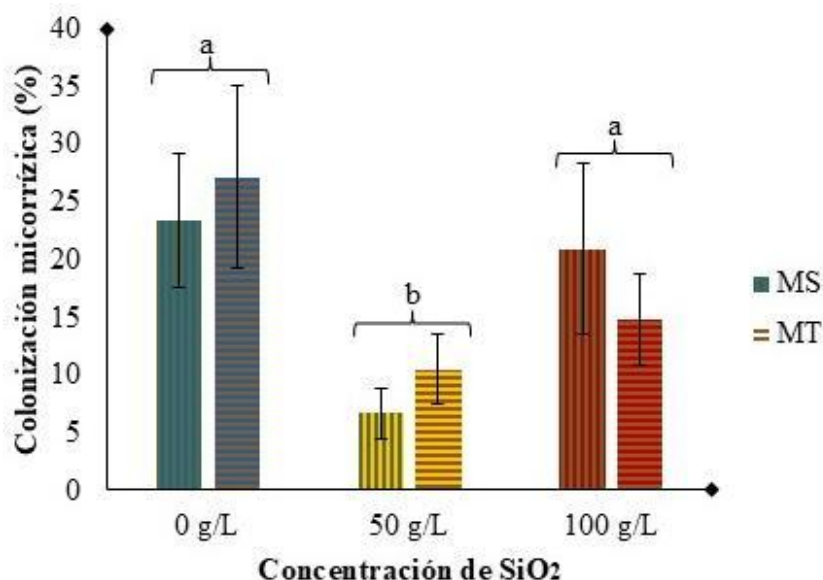


Figura 13. Efecto de la interacción micorriza y concentración de SiO₂ en plantas de chile a los 80 ddt. Letras distintas en barras, indican diferencia significativa (Tukey, $P<0.05$).

8.2.7. Discusión

Los resultados del presente estudio indicaron que las plantas micorrizadas con HMA de origen comercial al momento de la siembra (MS), mostraron los valores más bajos en prácticamente la mayoría de las variables evaluadas, lo que puede atribuirse a las condiciones iniciales de adaptación de las micorrizas, como sugieren Abarca y Gómez (2020), además de que las micorrizas en las primeras semanas no encuentran las condiciones ideales para reproducirse, ya que al emplear sistemas sin suelo, va a depender, según Palencia *et al.*, (2013) de las propiedades del sustrato, la fertirrigación del cultivo y la plantación o el trasplante, debido a que las micorrizas se encuentran en un momento crítico y con bastante actividad en las raíces. Por ello, Alarcón y Ferrera (1999), proponen que la inoculación al trasplante es la más efectiva, ya que facilita la colonización por contacto directo con la raíz, aunque la efectividad dependerá de la capacidad infectiva del hongo y de la susceptibilidad del huésped. Los resultados obtenidos destacan la relevancia del momento de inoculación y el tipo de HMA empleado en cultivos sin suelo. Las diferencias en el crecimiento observadas dependiendo del momento de la micorrización en sistemas hidropónicos sigue siendo limitada, especialmente en el caso del chile jalapeño; a pesar de que ha demostrado los

beneficios en la nutrición, crecimiento y producción de la inoculación con HMA en plantas de chile (Pereira *et al.*, 2015). La ventaja de la inoculación se debe a que la micorriza incrementa la absorción de nutrientes como fósforo, nitrógeno potasio y micronutrientes (Linderman, 1992; Perner *et al.*, 2007 y Sini *et al.*, 2024), beneficiosos como el silicio (Ju *et al.*, 2021), además de mejorar las relaciones hídricas de la planta (Smith & Read, 2008). De acuerdo a lo encontrado en este trabajo la inoculación al trasplante, se perfila como la estrategia más efectiva para optimizar el crecimiento del cultivo del chile jalapeño, favoreciendo la integración de la simbiosis micorrízica y maximizando sus efectos en el desarrollo vegetal. Ikiz *et al.*, (2009), reportaron un mayor beneficio de la micorrización en pimiento cuando se aplicaba en la siembra, pero reforzada al momento del trasplante.

Los resultados de colonización micorriza previo a la aplicación del dióxido de silicio en el agua de riego muestran altos porcentajes de colonización (80%), y no fue influenciado por el momento en que se realizó la inoculación con los HMA. Estos porcentajes son superiores a los reportados por Sini *et al.*, (2024), quienes trabajando con *R. irregularis* y *Funneliformis mosseae* en chile alcanzaron colonizaciones solo del 31.4%. Estas diferencias pueden deberse al tipo de inóculo utilizado, cultivar y medio de crecimiento usado en el crecimiento de las plantas. Por otro lado, al determinar la colonización micorrízica al final del experimento en las plantas que fueron irrigadas con SiO₂, se encontró que el porcentaje disminuyó en más del 73%, siendo mayor la disminución en las plantas irrigadas con la concentración de 50 gL⁻¹ de SiO₂. Esto podría estar indicando que el silicio ocasiona condiciones de estrés para la asociación simbiótica hongo-planta, se ha reportado que cuando existen condiciones de estrés por metales, los porcentajes de colonización disminuyen significativamente (Garg & Singh, 2018). Sin embargo, hacen falta estudios para poder precisar a partir de qué momento comienza a disminuir el porcentaje de colonización. Por su parte Hajiboland *et al.*, (2018), no encontró diferencias en el porcentaje de colonización de raíces de fresa inoculadas con distintos HMA (*R. clarus*, *R. intraradices* y *G. versiforme*) e irrigadas con una solución de 3 mmol L⁻¹ de Na₂SiO₃., reportando porcentajes cercanos al 35%. Lo anterior indica que, el efecto del silicio en la colonización micorrízica, depende de varios factores (fuente, concentración, medio de crecimiento, dependencia micorrízica, etc.), así mismo su efectividad en la simbiosis hongo-planta.

Con respecto al factor dióxido de silicio los resultados mostraron en general, un incremento en el crecimiento de chile jalapeño cuando las plantas fueron irrigadas con una concentración de 50 gL⁻¹, desde los 41 ddt y hasta el final del experimento. Asimismo, a partir de los 55 ddt, esta concentración de SiO₂ favoreció un incremento en las variables reproductivas como el número de hojas, botones y flores. Aunque el silicio (Si), no es considerado un nutrimento esencial, su impacto positivo en el desarrollo vegetal ha sido ampliamente documentado (Korndörfer & Lepsch, 2001; Guntzer *et al.*, 2012; Ju *et al.*, 2021 y Sourí *et al.*, 2021). Las plantas utilizan el silicio de una manera aún no bien comprendida, pero se sabe que estimulan el metabolismo antioxidante, los procesos de endurecimiento, defensa y adaptación de las plantas a los factores ambientales (López-Pérez *et al.*, 2018). Además, el silicio desempeña un papel clave en algunos procesos, como la biosíntesis de compuestos fenólicos, lignina y fitoalexinas, mejorando así los mecanismos de defensa de las plantas (Epstein, 1999; Guntzer *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2006). Además, el silicio aporta considerables beneficios al crecimiento vegetal gracias a su capacidad para mejorar el proceso de fotosíntesis, reducir las pérdidas por transpiración y mejorar la tolerancia de las plantas a diversos estreses abióticos y bióticos. Esto se logra principalmente mediante la regulación de la cadena de transporte de electrones, la homeostasis celular, la fosforilación oxidativa y todo el complejo fotosintético (Adrees *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2018). Por lo que su estudio se ha enfocado principalmente a su estudio bajo condiciones de estrés biótico (Karadzhova, 2024) o abiótico (Abdel-Aziz & Geeth, 2018). En particular en hortalizas, Giménez (2020), reportó que en tomate RAF cultivado sin suelo y con la adición de silicio aumentó la longitud y el diámetro del tallo en un 5%. Karadzhova (2024), reporta que plantas de chile asperjadas con una solución de SiO₂ + Fe, a razón de 0.05 mL L⁻¹, aumentó la masa radicular y foliar en un 19,40 % y 15,53 % respectivamente comparado con las plantas sin asperjar. En nuestro estudio, la concentración de 50 gL⁻¹ de SiO₂ incrementó la altura del chile jalapeño en un 16.22% y el diámetro del tallo en un 29.91% comparado con plantas sin SiO₂. Estos resultados coinciden con Reyes-Pérez *et al.*, (2023), quienes encontraron aumentos en altura, número de frutos y diámetro del tallo del pimiento, con este último incrementando un 19.54%. Asimismo, determinaron que la dosis óptima fue de 10 gplanta⁻¹, aplicados por vía foliar y en suelo. Por otro lado, Peñaloza, (2021), reportó efectos positivos en la altura (16.65% y 20.85%) y el número promedio de flores al usar fuentes

comerciales de SiO₂. Sin embargo, al aplicar estos productos cada 15 días, se observó un efecto fitotóxico leve, causando retraso en el crecimiento vegetal. Por ello, recomienda aplicar los productos comerciales de SiO₂ cada 21 días y cuando las plantas hayan desarrollado su sistema radical. De manera similar, en nuestro estudio, se observó que la concentración de 100 gL⁻¹, mostró efectos negativos en todas las variables agronómicas, con valores comparables a aquellos sin aplicación de SiO₂. Además, se observó en la base del tallo de las plantas donde se aplicó dióxido de silicio, un anillamiento lo cual dejaba frágil la planta, sin embargo, este daño no reflejó daños en la parte aérea (tabla 6). No existen trabajos sobre los posibles efectos negativos por altas concentraciones de silicio en hortalizas que se producen en hidroponía; sin embargo, Slomberg y Schoenfish (2012), reportan que la aplicación de nanopartículas de silicio (SiNP) de 50 y 200 nm a concentraciones de 250 y 1000 ppm durante seis semanas en *Arabidopsis thaliana* redujo el desarrollo de la planta en cultivo hidropónico; también observaron disminución en el diámetro de la roseta, la biomasa y la longitud del tallo, además de hojas cloróticas. Los autores atribuyen que a lo largo de las seis semanas existió elevación y variación del pH, pasando de 5.8 a 8.59, lo que indican que las SiNP por si solas no son fitotóxicas, pero se deben mantener el pH del medio del cultivo o eliminar la carga superficial de las SiNP por medio de calcinación. Tal como señalan Gottardi *et al.*, (2012), que la adición del silicio en las soluciones nutritivas para cultivos hidropónicos aporta grandes beneficios en *Valerianella locusta*, pero se debe tener en cuenta tanto el cultivar adecuado para este sistema de cultivo, los factores agronómicos y ambientales que podrían limitar los beneficios del silicio.

Tabla 6. Porcentaje de daño presentado en plantas de chile irrigadas con 50 y 100 g/L⁻¹. Flecha roja muestra un anillamiento en la base del tallo.

Conc. de SiO ₂				
Micorrización		0 g/L ⁻¹	50 g/L ⁻¹	100 g/L ⁻¹
Sin Micorriza (SM)		 0%	 43%	 86%
Micorriza a la Siembra (MS)		 0%	 86%	 57%
Micorriza al Trasplante (MT)		 0%	 86%	 43%

Los efectos sinérgicos entre los HMA y el silicio en otras especies vegetales, han sido reportado anteriormente; Hajiboland *et al.*, (2018), trabajando con plantas de fresa micorrizadas y sin micorrizar e irrigadas con 84 mg L⁻¹ Si como Na₂SiO₃, reportan un

incremento en el crecimiento y parámetros bioquímicos como concentración de fenoles en los tratamientos donde se combinaban ambos factores. Mencionan que la concentración interna de silicio incrementó en las plantas que estuvieron micorrizadas, lo cual provocó un aumento en la tasa fotosintética y mejor eficiencia en el uso del agua, lo cual ocasionó un incremento en el crecimiento de las plantas de fresa, así como una mayor colonización. Por su parte Das et al., (2021), también reportan un efecto sinérgico de los HMA y el silicio en plantas de arroz bajo diferentes regímenes de humedad en el suelo, ellos reportan que las plantas micorrizadas y con 300 kg ha⁻¹ de ácido monosilícico, incrementó la materia seca de tallos, en limitación de humedad. Estos autores mencionan que el silicio mejoró la capacidad de retención de agua de las plantas de arroz que junto con la micorrización ayudaron a que la falta de agua, no se reflejara en una disminución en el crecimiento. En nuestro caso el efecto sinérgico también se encontró en todas las variables evaluadas, pero solo cuando la concentración de silicio en el agua de riego pasó de 0 a 50 g L⁻¹, sin embargo, no alcanzó a ser estadísticamente significativo. Es probable que la concentración utilizada en este trabajo pudo ocasionar cierto nivel de estrés en las plantas por lo cual, no fuera tan evidente el efecto sinérgico de los HMA y el silicio como se ha reportado en otras especies vegetales y con dosis menores de silicio (Garg & Singh, 2018; Hajiboland *et al.*, 2018; Moradtalab *et al.*, 2019 y Sini *et al.*, 2024). Por otro lado cuando la concentración de SiO₂ pasó de 50 a 100 g L⁻¹, no se registró un incremento en las variables evaluadas, los valores en estos tratamientos fueron estadísticamente iguales a los registrado en las plantas que no fueron irrigadas con silicio, lo cual podría suponer que la micorrización contrarrestó el efecto nocivo que produciría una alta concentración de SiO₂ en el medio de crecimiento, como se registró en este trabajo que con una dosis de 100 g L⁻¹ de silicio el crecimiento disminuye. Se sabe que la micorrización contrarresta los efectos nocivos de metales pesados y otros elementos (Hildebrandt *et al.*, 2007; Bano & Ashfaq, 2013 y Riaz *et al.*, 2021).

8.2.8. Conclusiones

En este estudio se analizó mediante un ANOVA multifactorial de dos vías, el efecto de la micorrización por HMA, las concentraciones de dióxido de silicio y su interacción sobre el crecimiento de plantas de chile cultivar jalapeño. El análisis mostró efecto significativo de los factores en la mayoría de las variables evaluadas; el factor más determinante resultó ser las diferentes concentraciones de SiO₂. En general se encontró que cuando la concentración de SiO₂ pasó de 0 a 50 gL⁻¹ se registró un incremento en la mayoría de las variables evaluadas, pero cuando se adicionó la máxima concentración de silicio (100 gL⁻¹), se observó un efecto negativo en el crecimiento, al disminuir significativamente sus valores independientemente si se micorrizaban a la siembra o al trasplante y siempre fue menor cuando no se micorrizaron las plantas. Cuando se analizaron las interacciones se encontró que, la disminución observada en las plantas con la máxima concentración de silicio, era contrastada cuando las plantas eran micorrizadas preferentemente al trasplante.

8.2.9. Literatura consultada

- Abarca, A. X. & Gómez, Z. S. E. (2020). Efecto de la inoculación de micorrizas benéficas Mycoral® en patrones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la etapa de desarrollo vegetal. [Tesis de licenciatura no publicada]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/8f99c2b8-e656-4a85-8797-9b1f8ca67f13/content>
- Abdel-Aziz, m. A., & Geeth, r. H. (2018). Effect of foliar spray with some silicon sources and paclobutrazol on growth, yield and fruit quality of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) plants under high-temperature conditions. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 96(2), 577-593.
- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F. & Irshad, M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 119, 186-197.

- Alarcón, A. & Ferrera, C. R. (1999). Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra Latinoamericana*, 17(3):179-191. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57317302.pdf>
- Amanullah, & Khalid, S. (2020). Agronomy-Food Security-Climate change and the sustainable development goals. En: Amanullah (Ed.), *Agronomy Climate change & Food Security* (Cap. 1). IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.78102
- Bano, S. A., & Ashfaq, D. (2013). Role of mycorrhiza to reduce heavy metal stress. *Natural Science*, 5(12A), 16-20. DOI: 10.4236/ns.2013.512A003
- Bijalwan, P., Jeddi, K., Saini, I., Sharma, M., Kaushik, P. & Hessini, K. (2021). Mitigation of saline conditions in watermelon with mycorrhiza and silicon application. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28:3678-3684. DOI: 10.1016/j.sjbs.2021.05.019
- Kathpalia, R. & Bhatla, S. C. (2018). Plant Mineral Nutrition. En S. C. Bhatla & M. A. Lal (Eds.), *Plant Physiology, Development and Metabolism*, (pp. 37-81). Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-13-2023-1_2
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S. & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botánica Mexicana*, 129: e1932. DOI: 10.21829/abm129.2022.1932
- Chang, R. & Overby, J. K. A. (2019). Chemistry. McGraw-Hill Education.
- Cruz-Cárdenas, C. I., Zelaya, M. L. X., Sandoval, C. G., De los Santos, V. S., Rojas, A. E., Chávez, D. I. F. & Ruíz, R. S. (2021). Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: consideraciones y retos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5):899-913. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v12n5/2007-0934-remexca-12-05-899.pdf>
- Coutiño-Puchuli, A. E., Peña-Borrego, M. D. & Infante-Jiménez, Z. T. (2023). Estudio bibliométrico sobre biofertilizantes en México durante el periodo 2015 – 2020. *Terra Latinoamericana*, 41,1-14. e1449. DOI: 10.28940/terra. v41i0.1449

- Das, D., Basar, N. U., Ullah, H., Salin, K. R., & Datta, A. (2021). Interactive effect of silicon and mycorrhizal inoculation on growth, yield and water productivity of rice under water-deficit stress. *Journal of Plant Nutrition*, 44(18), 2756-2769.
- Delgado, S. H. D. & Gutiérrez, M. L. V. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *El Higo Revista de Ciencia y Tecnología*, 12(2):2-14. DOI: 10.5377/elhigo.v12i2.15196
- Evangelista, M. Z. & Battistoni, U. F. (2024). Desarrollo de inoculantes microbianos basados en microorganismos promotores del crecimiento vegetal como alternativa sustentable al uso de agroquímicos. En: Evangelista, M. Z. & Gastélum, M. É. (coord.). Inoculantes microbianos promotores del crecimiento vegetal como alternativa sustentable a los agroquímicos. CIATEJ.
- Frew, A., Powell, J.R., Allsopp, P.G., Sallam, N. & Johnson, S.N. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi promote silicon accumulation in plant roots, reducing the impacts of root herbivory. Springer International Publishing. Plant Soil. DOI: 10.1007/s11104-017-3357-z
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*. 50:641–664. DOI: 10.1146/annur ev.arpla nt.50.1.641
- Deb, L. y Dutta, P. (2022). Biogenic Role of Silicon in Abiotic and Biotic Stress Management in Plants. *J. Mycol Pl Pathol*, 52(2):103-122.
- Garg, N., & Singh, S. (2018). Arbuscular mycorrhiza *Rhizophagus irregularis* and silicon modulate growth, proline biosynthesis and yield in *Cajanus cajan* L. Millsp. (pigeonpea) genotypes under cadmium and zinc stress. *Journal of plant growth regulation*, 37, 46-63.
- Gastélum-Martínez, E. & Evangelista-Martínez, Z. (2024). Encapsulando a los microorganismos benéficos. En: Evangelista, M. Z. & Gastélum, M. É. (coord.). Inoculantes microbianos promotores del crecimiento vegetal como alternativa sustentable a los agroquímicos. CIATEJ.

- McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L. & Swan, J. A. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New phytologist*, 115(3): 495-501. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x
- Giménez, M. J. M. (2020). Efecto del silicio sobre la productividad de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) tipo RAF en cultivo sin suelo. [Trabajo de grado, Universidad de Almería]. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/9750>
- Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Cuacua-Temiz, C., Jácome, C. Ma. De los A. & Senties-Herrera, H. E. (2015). Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *Agroentorno*, 18(166):19-20.
- Gottardi, S., Lacuzzo, F., Tomasi, N., Cortella, G., Manzocco, L., Pinton, R., Römheld, V., Mimmo, T., Scampicchio, M., Dalla, C. L. y Cesco, S. (2012). Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 56:14-23. DOI: 10.1016/j.plaphy.2012.04.002
- Guntzer, F., Keller, C. & Meunier, J.-D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1):201-213. 10.1007/s13593-011-0039-8.
- Guo-chao, Y., Nikolic, M., Mu-jun, Y., Zhuo-xi, X. & Yong-chao, L. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10):2138-2150. DOI: 10.1016/S2095-3119(18)62037-4
- Haghighi, T. M., Saharkhiz, M. J. & Zareh, M. (2022). Mycorrhiza and Silicon Influence *Glycyrrhiza glabra* L. under Water-deficit; antioxidant Activity, Medicinal Metabolites and Mineralogical Analysis. *Research Square*, DOI: 10.21203/rs.3.rs-1807393/v1
- Hajiboland, R., Moradtalab, N., Aliasgharzad, N., Eshaghi, Z., & Feizy, J. (2018). Silicon influences growth and mycorrhizal responsiveness in strawberry plants. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 24, 1103-1115.

- Hildebrandt, U., Regvar, M. & Bothe, H. (2007). Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry*, 68(1), 139-146.
- İkiz, Ö., Abak, K., Daşgan, H. Y. & Ortaş, I. (2009). Effects of Mycorrhizal Inoculation in Soilless Culture on Pepper Plant Growth. *Acta Horticulturae*, 807:533-540. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.807.78
- INVAM. (2025). *Species Descriptions*. The University of Kansas. <https://invam.ku.edu/species-descriptions>
- Izquierdo, J. & Granados-Ortiz, S. (2011). Manual técnico. Producción artesanal de semillas de hortalizas para la huerta familiar. FAO. Santiago Chile. Pp: 98.
- Ju, S., Wang, N., Chen, M., & Wang, J. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi regulate tomato silicon absorption. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(4), 408-414.
- Karadzova, N. (2024). Effect of silicon foliar fertilization on limiting the growth of stem and root necrosis in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 30(3), 418-422.
- Kim, Y.-H., Khan, A. L. & Lee, I.-J. (2016). Silicon: A duo synergy for regulating crop growth and hormonal signaling under abiotic stress conditions. *Crit Rev Biotechnol* 36:1099–1109. DOI: 10.3109/07388 551.2015.10842 65
- Korndörfer, G. H., & Lepsch, I. (2001). Effect of silicon on plant growth and crop yield. En *Studies in plant science* (Vol. 8, pp. 133-147). Elsevier.
- Linderman, R. G. (1992). Vesicular-arbuscular mycorrhizae and soil microbial interactions. En G. J. Bethlenfalvay, & R. G. Linderman (Eds.). *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture* (pp. 45–70). ASA Special Publication 54. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy.
- López-Pérez, M. C., Pérez-Labrada, F., Ramírez-Pérez, L. J., Juárez-Maldonado, A., Morales-Díaz, A. B., González-Morales, S. & Benavides-Mendoza, A. (2018). Dynamic Modeling of Silicon Bioavailability, Uptake, Transport, and Accumulation: Applicability in Improving the Nutritional Quality of Tomato. *Frontiers in Plant Science*, 9. DOI: 10.3389/fpls.2018.00647

- Ma, J. F., Tamai, K., Yamaji, N., Mitani, N., Konishi, S., Katsuhara, M., & Yano, M. (2006). A silicon transporter in rice. *Nature*, 440(7084), 688-691.
- Ma, J. F. & Yamaji, N. (2015). A cooperated system of silicon transport in plants. Review. *Trends in Plant Science*, 20 (7): 435-442. DOI: 10.1016/j.tplants.2015.04.007
- Mishra, V., Ellouze, W. & Howard, R. (2018). Utility of arbuscular mycorrhizal fungi for improved production and disease mitigation in organic and hydroponic greenhouse crops. *Journal of Horticulture*, 5:237. DOI: 10.4172/2376-0354.1000237
- Mitani-Ueno, N. & Feng, M. J. (2020). Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(1), 10-17. DOI: 10.1080/00380768.2020.1845972
- Moradtalab, N., Hajiboland, R., Aliasgharzad, N., Hartmann, T. E., & Neumann, G. (2019). Silicon and the association with an arbuscular-mycorrhizal fungus (*Rhizophagus clarus*) mitigate the adverse effects of drought stress on strawberry. *Agronomy*, 9(1), 41.
- Nauma, S. R., Ali, H., Nawaz, F., Hussain, S., Areeb, A., Sarwar, N. & Ahmad, S. (2019). Use of biofertilizers for sustainable crop production. En Hasanuzzaman, M. (Ed.), *Agronomic Crops. Volume 2: Management practices*. Springer Nature Singapore. DOI: 10.1007/978-981-32-9783-8
- Othman, Y. A., Alananbeh, K. M. & Tahat, M. M. (2024). Can Arbuscular Mycorrhizal Fungi Enhance Crop Productivity and Quality in Hydroponics? A Meta-Analysis. *Sustainability*, 16(9),3662. DOI: 10.3390/su16093662
- Palencia, P., Martínez, F. & Oliveira, J. A. (2013). Efecto de micorrizas en plantas de fresa cultivadas en sistema de cultivo sin suelo. *Agrícola Vergel*,
- Perner, H., Schwarz, D., Bruns, C., Mader, P. & George, E. (2007). Effect of arbuscular mycorrhizal colonization and two levels of compost supply on nutrient uptake and flowering of pelargonium plants. *Mycorrhiza*, 17:469–474.
- Peñaloza, L. M. B. (2021). Evaluación de comportamiento agronómico del cultivo de tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) con aplicación de dióxido de silicio. [Proyecto de

- Investigación, Universidad Técnica de Ambato].
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstreams/38723f0d-c4bd-47b5-8ff9-e4973f7ed2c4/download>
- Phillips, J. M. & Hayman, D. A. (1970). Improved Procedures for Clearing Roots and Staining Parasitic and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Rapid Assessment of Infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55, 158-161. DOI: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3
- Raya, P. J. C. & Aguirre, M. C. L. (2012). El papel del Silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia Tecnológica*, 43: 42-46.
<https://www.redalyc.org/pdf/944/94424470007.pdf>
- Reven, J. A. (2003). Cycling silicon – the role of accumulation in plants. Commentary. *New Phytologist Forum*, 158:3 pp: 419-421. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003. 00778.x
- Reyes-Pérez, J. J., Rodríguez-Rodríguez, S., Torres-Rodríguez, J. A., Llerena-Ramos, L. T., Hernández-Montiel, L. G. & Ruiz-Espinoza, F. H. (2023). Biofortificación con Silicio en el Crecimiento y Rendimiento de Pimiento (*Capsicum annuum* L.) en Ambiente Controlado. *Terra Latinoamericana*, 41,1-10. E1749. DOI: 10.28940/terra.v41i0.1749
- Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Wang, Q., Cao, H., Yang, G., & Wang, X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123919.
- Ritchie, G. A., Landis, T. D., Katen, D. R. & Haase, D. L. (2004). Manual de viveros para la producción de especies forestales en contenedor. Volumen 7. Capítulo 2. Evaluación de la calidad de la planta. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
- Schink, B. (2002). Synergistic interaction in the microbial world. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81:257-261. DOI: 10.1023/A:1020579004534
- Sini, H. N., Barzegar, R., Mashae, S. S., Ghahsare, M. G., Mousavi-Fard, S., & Mozafarian, M. (2024). Effects of biofertilizer on the production of bell pepper (*Capsicum annuum*

- L.) in greenhouse. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101060. DOI: 10.1016/j.jafr.2024.101060
- Slomberg, D. L. & Schoenfisch, M. H. (2012). Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Science & Technology*, 46, 10247-10254. DOI: 10.1021/es300949f
- Smith, S. E. & Read, D. J. (2008). Mycorrhizal Symbiosis. London: Academic Press.
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N., & Ahmad, P. (2021). Silicon and plants: current knowledge and future prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 906-925.
- Suárez, A. S., Di P. M. A., Cardozo, P. G. & Travaglia, C. N. (2022). Técnicas de histología vegetal: un bordaje para su utilización en microscopía óptica. Río Cuarto: Un Río Editora, pp: 40.
- Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A. & Zeiger, E. (2023). Plant Physiology and Development (7^a ed.). Oxford University Press.
- Vega, I., Pontigo, S., Nunes-Nesi, A., Mora, M. de la L., Meier, S. & Cartes, P. (2023). Interaction between silicon and arbuscular mycorrhizal symbiosis: an ecologically sustainable tool to improve crop fitness under a drought scenario? *Journal of Soil Science and Plant*, 23, 125-138. DOI: 10.1007/s42729-021-00701-y
- Wang, M., Gao, L., Dong, S., Sun, Y., Shen, Q. & Guo, S. (2017) Role of silicon on plant–pathogen interactions. *Front Plant Sci* 8:701–701. DOI: 10.3389/fpls.2017.00701
- Weather Spark,. (2024). Datos históricos meteorológicos de la primavera 2024 en Morelia, México. <https://es.weatherspark.com/h/s/4452/2024/0/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-la-primavera-2024-en-Morelia-M%C3%A9xico>
- Yan, G., Nikolic, M., Ye, M., Xiao, Z. & Liang, Y. (2018) Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *J Integr Agric* 17:2138–2150. DOI: 10.1016/s2095-3119(18)62037 -4

8.3. Capítulo III: Hongos micorrízicos arbusculares y dióxido de silicio como alternativa de control contra *Phytophthora capsici* en chile jalapeño

8.3.1. Resumen

La producción de hortalizas enfrenta diversos estreses bióticos que afectan la calidad y rendimiento, uno de los principales son las enfermedades, siendo el oomycete *Phytophthora capsici* uno de los patógenos más destructivos en *Capsicum* spp. El manejo convencional con fungicidas sintéticos ha generado resistencia y afecta el ambiente y la salud humana. Por ello, se han propuesto alternativas sostenibles como agentes de biocontrol en la que destaca el uso de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y elementos beneficiosos como el silicio, que promueven la resistencia sistémica, la producción de compuestos antifúngicos y el fortalecimiento de estructuras celulares. Si bien se ha reportado sobre sus efectos individuales, son escasas las investigaciones que exploran su acción sinérgica. En este trabajo de investigación se planteó como objetivo, evaluar la interacción entre los HMA y la aplicación de silicio frente al daño causado por *P. capsici* y el crecimiento en chile jalapeño. Los resultados mostraron que el factor micorrización no disminuyó el daño ocasionado por *P. capsici*, sin embargo, el factor silicio resultó significativo en el crecimiento de las plantas de chile ante las concentraciones de 25 y 50 gL⁻¹ por lo que también presentaron un menor nivel de severidad ocasionado por el patógeno. Estos resultados evidencian que el silicio, en dosis intermedias podría ser una estrategia eficaz para el manejo sostenible de *P. capsici* en chile jalapeño, sin embargo, la interacción entre los HMA y SiO₂ no se evidencio sinergismo ya que puede depender de múltiples factores como el tipo de cultivar que se emplea, la virulencia del patógeno y las condiciones en que se desarrolló el sistema.

Palabras clave: *Rhizophagus*, severidad, biocontrol, elementos beneficios, *Capsicum*

8.3.2. Chapter III: Arbuscular mycorrhizal fungi and silicon dioxide as an alternative control against *Phytophthora capsici* in jalapeño pepper

8.3.3. Abstract

Vegetable production faces various biotic stresses that affect quality and yield, with diseases being among the main constraints. The oomycete *Phytophthora capsici* is one of the most destructive pathogens in *Capsicum* spp. Conventional management with synthetic fungicides has led to resistance and poses risks to the environment and human health. Therefore, sustainable alternatives have been proposed as biocontrol agents, among which arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and beneficial elements such as silicon stand out, as they promote systemic resistance, antifungal compound production, and the strengthening of cell structures. Although individual effects have been reported, studies exploring their synergistic action are scarce. The objective of this study was to evaluate the interaction between AMF and silicon application against damage caused by *P. capsici* and on jalapeño pepper growth. Results showed that the mycorrhization factor did not reduce the damage caused by *P. capsici*; however, silicon had a significant effect on plant growth at concentrations of 25 and 50 g L⁻¹, where plants also showed lower severity levels of disease. These findings indicate that intermediate doses of silicon could be an effective strategy for the sustainable management of *P. capsici* in jalapeño pepper. Nonetheless, no synergism between AMF and SiO₂ was observed, likely due to multiple factors such as cultivar type, pathogen virulence, and system conditions.

Keywords: *Rhizophagus*, severity, biocontrol, beneficial elements, *Capsicum*

8.3.4. Introducción

Las especies vegetales como los cultivos hortícolas, se ven afectados por diversos tipos de estreses tanto abióticos como bióticos (Narayanasamy, 2013). En la producción intensiva de hortalizas, las condiciones ambientales como el clima, el suelo y el riego pueden favorecer al desarrollo de plagas y enfermedades, lo cual, incrementa los costos de producción, las pérdidas en el rendimiento y la calidad de los productos cosechados (Rangaswami & Mahadevan, 2006; Narayanasamy, 2013 y Grageda *et al.*, 2014). Las pérdidas económicas más significativas en los cultivos, son causadas por patógenos fúngicos, bacterias, oomycetes y nematodos, por lo cual, para proteger y mejorar la productividad de los cultivos se recurre al uso excesivo e irracional de productos químicos sintéticos (Dukare *et al.*, 2021); este tipo de prácticas ha ocasionado distintos efectos adversos en los agroecosistemas, principalmente la degradación de los suelos, contaminación ambiental, daños en la salud de los productores y tolerancia de los agentes causales a los productos químicos. Por lo que es necesario implementar estrategias efectivas, que sean amigables con el ambiente y preferentemente no generen resistencia. El uso de los agentes de biocontrol representa una alternativa viable, con el fin de reducir la incidencia e intensidad de las enfermedades causadas por patógenos microbianos, entre los que destacan los agentes de biocontrol o microbios antagonistas que reducen la severidad de enfermedades mediante la producción de compuestos antifúngicos y otros mecanismos como la secreción de enzimas mucolíticas, de antibióticos y por la competencia de nutrientes y de espacio, activación de mecanismos de defensa de las plantas (Narayanasamy, 2013 y Dukare *et al.*, 2021); así como también, el uso de los agentes abióticos, los cuales presentan mecanismos de acción directos e indirectos sobre los patógenos microbianos (Narayanasamy, 2013).

La protección de las plantas puede lograrse también, aprovechando las formas adecuadas de interacción entre los agentes de biocontrol contra los fitopatógenos (Narayanasamy, 2013), tal como son los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), los cuales, inducen mecanismos de defensa en las plantas contra enfermedades y son capaces de impedir a los patógenos microbianos en acceder a los tejidos específicos, en competir el espacio radicular y por nutrientes (Narayanasamy, 2013 y Hohmann & Messmer, 2017).

Por otra parte, se ha demostrado que el uso de los elementos beneficiosos actúa como bioestimulantes, ya que promueven el crecimiento vegetal, mejoran la tolerancia a estreses de tipo abióticos y bióticos, asimismo, contribuyen a una agricultura sostenible (Singhal *et al.*, 2022). En particular el silicio, se ha demostrado ser un elemento eficaz en el manejo sostenible de enfermedades vegetales al inducir resistencia sistémica y fortalecer las barreras estructurales de las plantas (Pandey *et al.*, 2024). Del mismo modo, limita la proliferación de patógenos al estimular las respuestas de defensa en la planta como la producción de compuestos fenólicos, el fortalecimiento de la pared celular y la expresión de proteínas relacionadas a la patogénesis (Ahammed & Yang, 2021). Esto se debe a que el silicio interactúa con componentes del sistema de señalización del estrés en las plantas, lo cual conduce a una resistencia inducida (Fauteux *et al.*, 2005). La biofortificación de cultivos agrícolas con elementos beneficiosos representa una alternativa actual y futura, lo que genera nuevas investigaciones en torno a la nutrición mineral y a la respuesta al estrés en los cultivos (Singhal *et al.*, 2022). Existen estudios donde han evaluado la efectividad del silicio como agente de control contra fitopatógenos (Kostic *et al.*, 2023 y Álvarez *et al.*, 2023). Sin embargo, no hay un consenso general de su eficacia, lo cual hace suponer que su efecto depende de diversos factores; Álvarez *et al.*, (2023), reportan un efecto benéfico de la aplicación de silicio en el control de *Phytophthora cinnamomi* en aguacate, y mencionan que la acción del silicio está relacionada con la activación de vías enzimáticas relacionadas con la regulación del estrés oxidativo y la síntesis de componentes estructurales.

Entre los cultivos de relevancia global se incluyen los cultivares del género *Capsicum* spp., esta hortaliza cuenta con un alto valor nutrimental y tienen beneficios reconocidos para la salud (Khiar *et al.*, 2018). Sin embargo, este cultivo se ve amenazado por el aumento y variabilidad de los factores ambientales, los cuales afectan negativamente el desarrollo vegetal y por ende la producción (Zhang *et al.*, 2024). Por otra parte, *Capsicum* spp., es susceptible a diversas enfermedades causadas por virus, bacterias, hongos y *P. capsici* Leonian, este fitopatógeno es altamente destructivo y afecta a todos los órganos de la planta provocando la pudrición de raíz, corona, fruto y tizón foliar, por lo que representa uno de los mayores retos en el manejo sanitario en el campo (Moreira-Morrillo *et al.*, 2023 y Sonogo *et al.*, 2023). En México, su presencia y distribución está en todas las regiones productoras (Zapata-Vázquez *et al.*, 2012 y Sánchez-Gurrola *et al.*, 2019), se ha reportado también en

regiones productoras de solanáceas y cucurbitáceas en los municipios de Michoacán y Jalisco (Reyes-Tena *et al.*, 2021).

Actualmente ningún fungicida puede prevenir esta enfermedad o controlar por completo sus efectos, y la mayoría de los compuestos están elaborados con base en el compuesto mfenoxam, un fungicida empleado por muchos años para controlar las diversas poblaciones del fitopatógeno y al cual los patógenos ya han generado resistencia (González-Tobón *et al.*, 2022).

Por otro lado, son escasas las investigaciones que abordan la acción sinérgica entre los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y el silicio frente a los fitopatógenos en los cultivos hortícolas. La mayoría de los estudios disponibles se centran principalmente en los efectos sobre el crecimiento vegetal, tal como lo indican Qiu *et al.*, (2024), en plantas de arroz inoculadas con HMA y silicio, donde mencionan que ambos influyen en el crecimiento vegetal y en la absorción del silicio por las plantas, siendo las raíces las que presentaron un alto contenido de Si y aumento en la colonización de HMA; o su efecto en la mitigación de estreses hídricos o salinos (Etesami *et al.*, 2022) o por metales pesados (Zia *et al.*, 2023). Por lo anterior en este trabajo se tuvo como objetivo, evaluar el efecto de la interacción entre hongos micorrízicos arbusculares y dióxido de silicio en el daño ocasionado por *Phytophthora capsici* L., en plantas de chile cultivar jalapeño.

8.3.5. Materiales

8.3.5.1. Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el laboratorio de Ecofisiología Vegetal e invernaderos pertenecientes al cuerpo académico de Ecofisiología vegetal en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la UMSNH.

8.3.5.2.Plántulas de chile

Para este experimento se utilizaron plantas de chile cultivar jalapeño, el cual en ensayos anteriores mostró tener una alta emergencia, colonización micorrízica, presencia de arbusculos, así como también a responder a alternativas de crecimiento vegetal tanto al uso de hongos micorrízicos arbusculares como a la adición de SiO₂. Las semillas de chile jalapeño se pusieron a germinar, para esto se enjuagaron con agua corriente y se dejaron en cloro al 5% durante cinco minutos; transcurrido el tiempo se empleó un colador de plástico para recolectar las semillas y se enjuagaron con abundante agua desionizada para eliminar los residuos restantes de cloro. Por último, se dejaron las semillas en una superficie absorbente y extendidas hasta su siembra Izquierdo y Granados (2011). La siembra se realizó en charolas de aluminio con dimensiones de 33 X 26.8 X 6.3 cm, las cuales contenían el sustrato suficiente para formar una capa de 5 cm de espesor. Una vez colocadas las semillas en ambas charolas, se cubrieron con el sustrato de germinación y se cubrieron con plástico. En todo momento el sustrato de las charolas se mantuvo a capacidad de contenedor con agua desionizada para favorecer la germinación. Las charolas fueron colocadas entre octubre y diciembre del 2024, se mantuvieron en condiciones ambientales con una temperatura entre 14 a 28 °C (Weather Spark, 2024), para asegurar su protección, se ubicaron bajo techo y sobre una mesa dentro del laboratorio de Ecofisiología Vegetal del IIAF.

8.3.5.3.Sustratos

8.3.5.3.1. Para germinación

Se utilizó una mezcla de arena roja (tezontle) y blanca (arena de río), a una proporción de 1:1 v/v, esta mezcla se esterilizó a 121 °C a 15 lb de presión atmosférica por 1 hora en autoclave.

8.3.5.3.2. Para trasplante

Se empleó una mezcla de sustrato estéril compuesto de peat-most, agrolita y vermiculita (3:2:1 v/v).

8.3.5.4.Hongo micorrízico

Se utilizó el inóculo micorrízico comercial denominado “Micorrizas”, este se adquirió en una local comercial en Morelia, Michoacán y contiene las especies *R.G. intraradices* y *R. Fasciculatum*.

8.3.5.5.Silicio

La fuente de silicio utilizada en este trabajo fue dióxido de Silicio (SiO₂), se adquirió en la empresa de agroinsumos Bioaplicaciones S.A., ubicada en Zapopan, Jalisco. La pureza del producto es del 99% de SiO₂, su origen es de tipo mineral de las piedras de diatomeas. Las especificaciones que indica la ficha técnica del insumo son:

- Color: blanco
- Densidad Aparente (gmL⁻¹): 0.09 – 0.12
- Densidad Compactada (gmL⁻¹): 0.13 – 0.16
- pH al 5%: 6.5 – 7.5
- Humedad Máxima: 105 °C/2hrs

8.3.5.6.Inóculo de *Phytophthora capsici*

Este aislado identificado como CPV-271, fue donado por el Laboratorio de Patología Vegetal del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la UMSNH, se obtuvo en el año 2016 a partir de tejido de *Capsicum annuum* (cultivar serrano) en el municipio de

Tarímbaro, Michoacán. Según Reyes-Tena, (2020), esta cepa corresponde al fenotipo de virulencia MX-7. Para su reactivación, se transfirió un fragmento del medio harina de maíz a medio PDA (Papa Dextrosa Agar) y se incubó a 26°C.

8.3.6. Métodos

8.3.6.1. Elección del método de inoculación del patógeno

Se estableció un experimento para seleccionar el mejor método de inoculación del patógeno en las plantas de chile. Para esto se utilizaron plantas de chile de 59 días después de la siembra (dds), cuando las plántulas tenían una altura uniforme y más de cuatro hojas verdaderas, se trasplantaron en macetas negras de 500 mL, se utilizó el sustrato de trasplante (previamente descrito). Se diseñó un experimento completamente al azar evaluando como factor el método de inoculación de *P. capsici* en plantas de chile jalapeño (Tabla 7). Cada tratamiento tuvo 4 repeticiones y la unidad experimental fue de una maceta con una planta de chile. Se adicionó un control sin inoculación con el patógeno el cual se repitió dos veces.

Tabla 7. Diseño experimental los métodos de inoculación de *P. capsici* en chile jalapeño

Factor	Nivel	Tratamiento
Método de inoculación	Disco de micelio	T1
	Esporangios y zoosporas	T2

8.3.6.1.1. Método de inoculación con discos de micelio

El micelio del aislado CVP-271, se cultivó en medio PDA durante cinco días a 26°C en incubadora. Posteriormente, se extrajeron con un sacabocados estéril tres discos de micelio joven. Para la inoculación, se removió ligeramente el sustrato en la base del tallo de la planta y se colocaron los tres discos directamente en la raíz, asegurando el contacto entre el micelio y el sistema radicular (Fig. 14a, b y c).

8.3.6.1.2. Método de inoculación con esporangios y zoosporas

El micelio del aislado se cultivó en cajas Petri con medio agar-V8 durante cinco días y se dejaron en incubación a 26°C. Posteriormente, al medio de cultivo se realizaron cortes en forma de cubos y se enjuagó con agua desionizada estéril para reducir nutrientes y favorecer la esporulación. Esto se realizó tres veces durante tres días, o hasta observar la presencia de esporangios. Para liberar las zoosporas, el aislado se sometió a un cambio de temperatura de 4°C durante 30 min en refrigeración. Tras la refrigeración, se observó con el estereoscopio la presencia de zoosporas nadando en la suspensión, por lo que se recolectó dicha suspensión en un vaso de precipitado estéril y se diluyó un poco para después tomar 1 mL, y se dejó en un microtubo Eppendorf estéril de 2 mL para agregar una gota de azul de lactofenol, esto para inmovilizar las zoosporas y proceder a cuantificación mediante una cámara de Neubauer. La suspensión preparada contenía 1×10^4 zoosporas. mL⁻¹, y se inoculó 1 mL en la base del tallo y cerca de la raíz de cada planta de chile jalapeño (Fig. 14d-i).

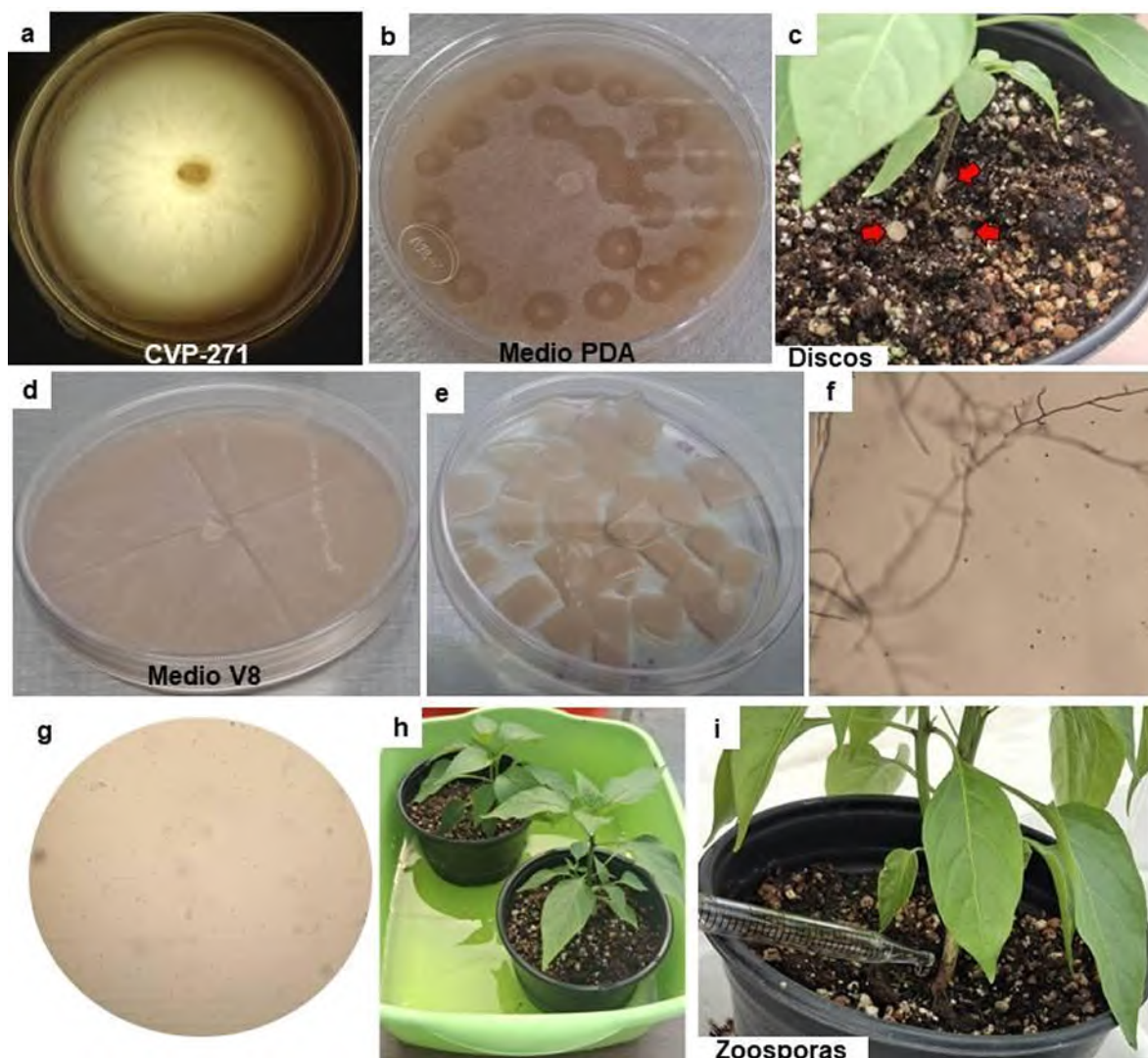


Figura 14. Técnicas de inoculación de *P. capsici* en chile jalapeño. a) cepa de *P. capsici* (CVP-271); b) cultivo para la elaboración de discos con un sacabocados; c) inoculación de discos con micelio cerca de la base y en contacto con la raíz; d) crecimiento de *P. capsici* en medio V8; e) corte y enjuague del medio agar-V8 para la producción de esporangios; s) vista en estereoscopio y liberación de las zoosporas; g) cuantificación de zoosporas en cámara de Neubauer; h) condicionamiento previo a la inoculación e i) inoculación por zoosporas en la base del tallo.

8.3.6.1.3. Condiciones del experimento

Las plantas inoculadas por ambos métodos, se establecieron en condiciones de invernadero y previo a la infección se colocaron dentro de charolas de plástico sin drenaje y

se saturó el sustrato con agua desionizada para favorecer el establecimiento del fitopatógeno. Con el método de zoosporas se mantuvieron por 24 horas las plantas sumergidas en agua y trascurrido este tiempo, las macetas fueron colocadas individualmente en platos de unicel.

Ambas técnicas se inocularon en plantas de chile con 45 días después del trasplante (ddt), después de la inoculación las plantas fueron regadas por encima de la capacidad de campo diariamente para facilitar la infección y una vez por semana se regaron con una solución nutritiva Hoagland. A los 69 ddt, se realizó una segunda infección en todas las plantas por lo que se agregaron dos discos adicionales por planta (total de cinco discos por planta) y se aumentó la concentración de zoosporas teniendo un total de 2×10^4 zoosporas. mL⁻¹ por planta para este método.

8.3.6.2. Evaluación de la severidad de la enfermedad por *P. capsici* L. en chile jalapeño

Para determinar el daño ocasionado por el fitopatógeno, se evaluó la sintomatología foliar y radicular mediante una escala de severidad ajustada con base a las escalas de Glosier *et al.*, (2008); Andrade-Luna *et al.*, (2017) y Parada-Rojas *et al.*, (2021), desarrolladas para cultivares de *Capsicum* spp. y de pimiento, respectivamente. En la Tabla 8 y 9, se presentan las modificaciones registradas y adaptadas para la severidad observada en las plantas de chile jalapeño.

Tabla 8. Escala de severidad de daño foliar por *P. capsici* adaptada y modificada para el cultivar jalapeño.

Nivel	Escala	Descripción
0	Planta sana	No se observan síntomas, hojas turgentes y de color verde intenso, tallo erguido. Sistema radical sano y abundante, no se observa necrosis en haces vasculares. No se observa necrosis entre la zona de transición del tallo y las raíces.

1	Marchitez leve	Planta con comienzo de síntomas las primeras hojas inferiores son amarillentas y encorvadas, se aprecia necrosis entre la zona de transición entre el tallo y raíces.
2	Marchitez moderada	Planta con el 30% de hojas encorvadas y blandas, de color amarillosas y en su totalidad son poco turgentes. Tallo con necrosis hasta un 5%.
3	Marchitez avanzada	Planta con el 50% de las hojas encorvadas y cloróticas, con poca turgencia y decaídas, el 5% de las hojas basales son desprendidas (solo en movimiento). Tallo con necrosis extendida hasta un 10% a la parte aérea y el crecimiento se detiene.
4	Marchitez muy avanzada	Planta con el 75% de hojas muy encorvadas, flacidez foliar y con más de 50% de las hojas son desprendidas con el movimiento. Necrosis del tallo mayor al 30% de su longitud y de aspecto deshidratado.
5	Marchitez severa	Planta muerta y severamente afectada. Hojas secas con 90 al 100% defoliación. Tallo con necrosis avanzada al 50% casi en su totalidad, decaído y de aspecto seco.

Tabla 9. Escala de severidad de daño por *P. capsici* adaptada y modificada a partir de la escala de Glosier *et al.*, (2008); para el sistema radicular de plantas de chile jalapeño.

Nivel	Sintomatología
0	Raíz sana, sin presencia de síntomas.
1	Zona de transición entre el tallo, la raíz principal y secundarias con ligera necrosis.
2	Zona de transición entre el tallo, la raíz principal y el 5% de raíces secundarias con necrosis.
3	Sistema radicular necrosado en un 10 %, raíces secundarias destruidas en un 5-10% y reducción en biomasa de la raíz.
4	Sistema radicular necrosado y destruido en un 15 a 20%, pérdida de raíces adventicias en un 20%, reducción en biomasa de la raíz en un 30%.

5	Sistema radical necrótico, raíces con desprendimiento de epidermis (pérdida del 30 a 50% del volumen radical). Desprendimiento total de la zona de transición entre el tallo y raíz principal. Se observa tejido degradado en los haces vasculares y reducción en biomasa de la raíz en un 50% o mas
---	--

8.3.6.3. Experimento de control de *P. capsici* por HMA y SiO₂ en plantas de chile jalapeño

Para evaluar el control de la enfermedad causada por *P. capsici* en chile, se estableció un experimento con plantas de chile de 39 días después de la siembra (dds), cuando las plántulas tenían una altura uniforme. Estas se trasplantaron a macetas negras de 1 L, utilizando el sustrato de trasplante previamente descrito. Al momento del trasplante, se aplicaron los hongos micorrízicos arbusculares (HMA); para esto, se inoculó 0.24 g del inóculo comercial por plántula. La inoculación se realizó directamente en la raíz, asegurando su completa adherencia. El inóculo restante fue adicionado al orificio del trasplante. Las plantas se dejaron aclimatar por 42 días después del trasplante (ddt) y posteriormente se aplicaron semanalmente, las distintas concentraciones de dióxido de silicio junto con el agua de riego.

8.3.6.3.1. Tratamientos y diseño experimental

Para evaluar la severidad de *P. capsici* en plantas de chile jalapeño bioprotegidas con HMA y adicionadas con diferentes concentraciones de SiO₂, se diseñó un experimento factorial (Tabla 10).

Tabla 10. Factores y niveles para la evaluación de la severidad de *P. capsici* en plantas de chile jalapeño micorrizadas y suplementadas con distintas concentraciones de silicio.

Plantas inoculadas con <i>P. capsici</i>		
Factor	Niveles	Tratamientos
Micorrización	Sin Micorriza	T1: SM*0g/L
	Con Micorriza	T2: SM*25g/L

Concentración de SiO₂	0g/L	T3: SM*50g/L
		T4: SM*75g/L
	25g/L	T5: SM*100g/L
		T6: MT*0g/L
	50g/L	T7: MT*25g/L
		T8: MT*50g/L
	75g/L	T9: MT*75g/L
	100g/L	T10: MT*100g/L

La combinación de los niveles de los factores evaluados generó diez tratamientos, cada tratamiento se repitió 10 veces y la unidad experimental consistió en una planta de chile en una maceta. El experimento tuvo una distribución completamente al azar.

8.3.6.3.2. Condiciones y manejo del experimento

El experimento se mantuvo en condiciones de invernadero, todas las macetas fueron regadas con agua desionizada con la finalidad de mantener al sustrato a capacidad de contenedor cada vez que se requería. A los 41 ddt, se extrajo raíz para cuantificar el porcentaje de colonización micorrízica previo a la aplicación de SiO₂ y a los 42 ddt se adicionaron las cinco concentraciones del SiO₂ de acuerdo con el tratamiento. Esta se realizó junto con el agua de riego y se mantuvieron las aplicaciones semanalmente hasta el final del experimento. Para mantener una buena nutrición de las plantas, se fertirrigaron semanalmente con 100 mL de solución nutritiva de Hoagland. La composición química de la solución nutritiva fue: KNO₃ (30 mL); Ca (NO₃)₂ (20 mL); MgSO₄ (5 mL); micronutrientes (H₃BO₃; ZnSO₄; CuSO₄; (NH₄)₂MoO₄) (5 mL); Fe EDTA (5 mL) y 50% de K₃PO₄ (5 mL), por litro. La solución nutritiva fue preparada con sales grado reactivo y agua desionizada y se aplicó dos días antes de la aplicación del dióxido de silicio.

8.3.6.3.3. Inoculación de las plantas de chile con el fitopatógeno

A los 62 ddt, se inocularon las plantas de chile jalapeño con *P. capsici*, el método de inoculación fue mediante zoosporas, la suspensión preparada contenía 1×10^4 zoosporas.mL⁻¹ y se inoculó 1 mL en la base del tallo y cerca de la raíz de cada planta de chile jalapeño.

8.3.6.3.4. Muestreos y Variables Evaluadas

Al final del experimento (80 ddt), se registró la altura de la planta (AP), diámetro del tallo (DT), siguiendo los criterios y técnicas de Ritchie *et al.*, (2004); número de hojas (NH), que fue determinado mediante conteo visual de hojas verdaderas (se descartaron hojas secas); número de botones (NB) y número de flores (NF), fueron registrados visualmente, la longitud de raíz (LR), el peso seco tanto de la parte aérea (PSPA), de la raíz (PSR) y peso seco total (PST). Estas variables se determinaron utilizando una balanza de precisión (Mettler Toledo PR8002) y los resultados fueron registrados en gramos (g). Para el peso seco, las muestras se secaron en una estufa a 50 °C durante cuatro días o hasta que alcanzaron un peso constante.

8.3.6.3.5. Variables microbiológicas

Se determinó el porcentaje de colonización micorrízica (%PCM) previo a la aplicación del SiO₂ y al final del experimento; para esto se recolectaron muestras de raíces de las plantas de chile jalapeño conforme al protocolo propuesto por Suárez *et al.*, (2022). A las muestras se les realizó un clareado y tinción de acuerdo con lo descrito por Phillips y Hayman (1970). Por último, el cálculo de %PCM se realizó siguiendo la metodología de McGonigle *et al.*, (1990).

8.3.6.3.6. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de ambos ensayos, se procesaron en Excel para la creación de bases de datos y posteriormente fueron analizados estadísticamente en RStudio. Se aplicó un ANOVA multifactorial de dos factores y la prueba de Tukey para comparación de medias con una significancia del 0.05%. La severidad del daño se evaluó con estadística no paramétrica mediante la prueba de Kruskal Wallis y la comparación de las medianas entre factores e interacción se realizó con la prueba de Games-Howell, con una significancia del 0.05%.

8.3.7. Resultados y discusión

8.3.7.1. Comparación de técnicas de inoculación de *P. capsici* en chile jalapeño

En este ensayo se compararon dos técnicas de inoculación de *P. capsici* en el cultivar jalapeño, utilizando como inóculo: discos de micelio producido en medio PDA y por zoosporas. En la figura 15, se muestra el grado de avance de la sintomatología observada en la superficie foliar de las plantas de chile en ambos métodos de inoculación. Los síntomas comenzaron a manifestarse a los 17 ddi (disco) y 26 ddi (zoosporas). El tiempo de manifestación de los síntomas y nivel de severidad alcanzado fue muy similar en ambos métodos (Fig. 16). Sin embargo, el método por disco, manifestó síntomas de daño en la primera inoculación del fitopatógeno a diferencia de las plantas inoculadas por zoosporas. La técnica de inoculación mediante discos de micelio permite introducir directamente estructuras del patógeno en crecimiento activo, lo cual acelera el proceso de patogénesis al establecer contacto inmediato con los tejidos vegetales, como lo señalan Chaube y Pundhir (2022). En contraste, las zoosporas son propágulos móviles típicos de los oomycetos y poseen adaptaciones que les permiten detectar señales químicas específicas como los exudados por las raíces (West *et al.*, 2003), lo que probablemente retrasó el proceso infeccioso en el presente estudio. Sin embargo, son altamente eficaces como agentes de disseminación en los ambientes acuáticos ya que se dispersan fácilmente en aguas libres y superficiales, lo que contribuye a conocer su importancia debido a que de manera natural en México Cárdenas *et al.*, (2021) identificaron cinco especies de *Phytophthora* spp. con capacidad patogénica en hortalizas y los sistemas de riego, los cuales son reservorios de zoosporas infecciosas causando síntomas de marchitez y pudrición en las hortalizas.

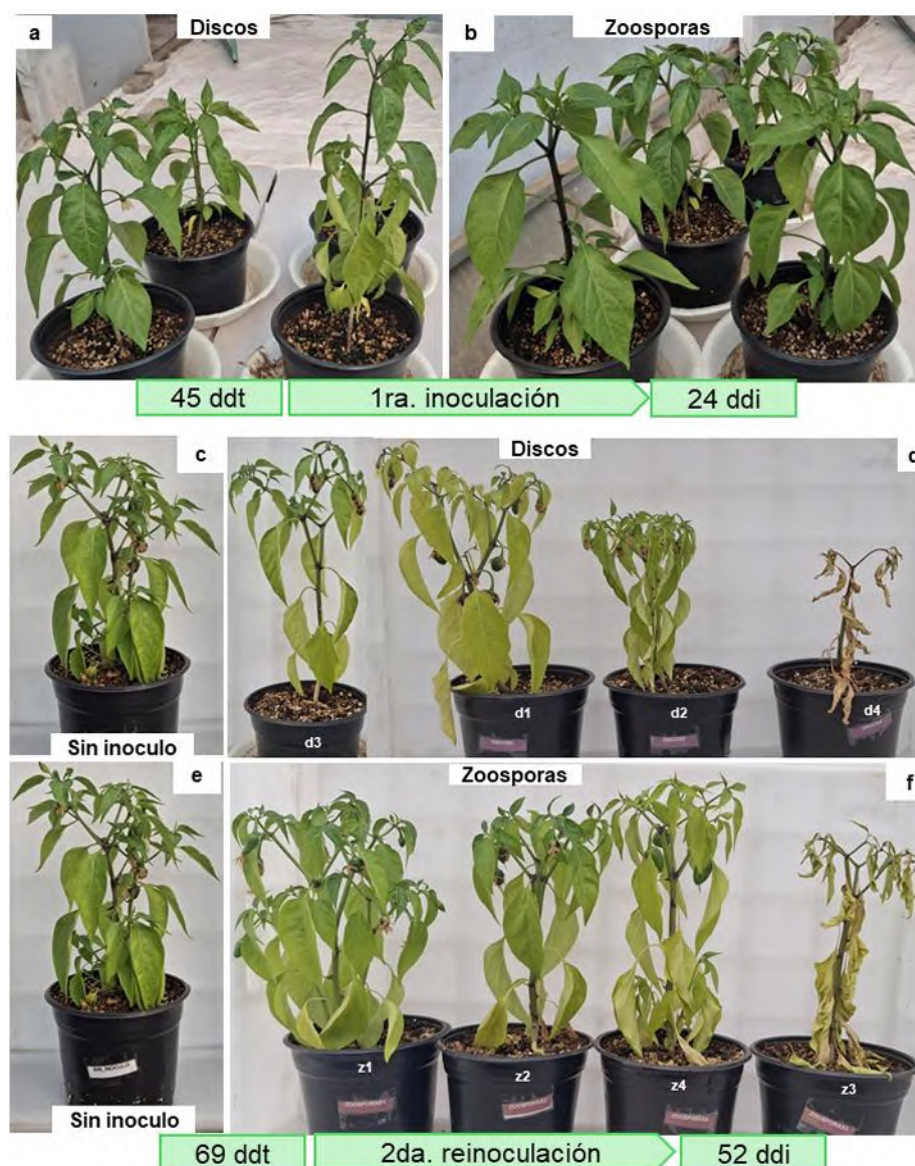


Figura 15. Comparación entre la inoculación de *P. capsici* mediante discos de micelio y zoosporas; a y b) plantas con 45 días después del trasplante (ddt) e inoculadas con discos de micelio y por zoosporas, la observación fue hasta los 24 días después de la inoculación; e) plantas con 69 ddt y sin inóculo; d y f) plantas con 69 ddt y a las cuales se les reinoculó el fitopatógeno, la observación fue hasta los 52 ddi.

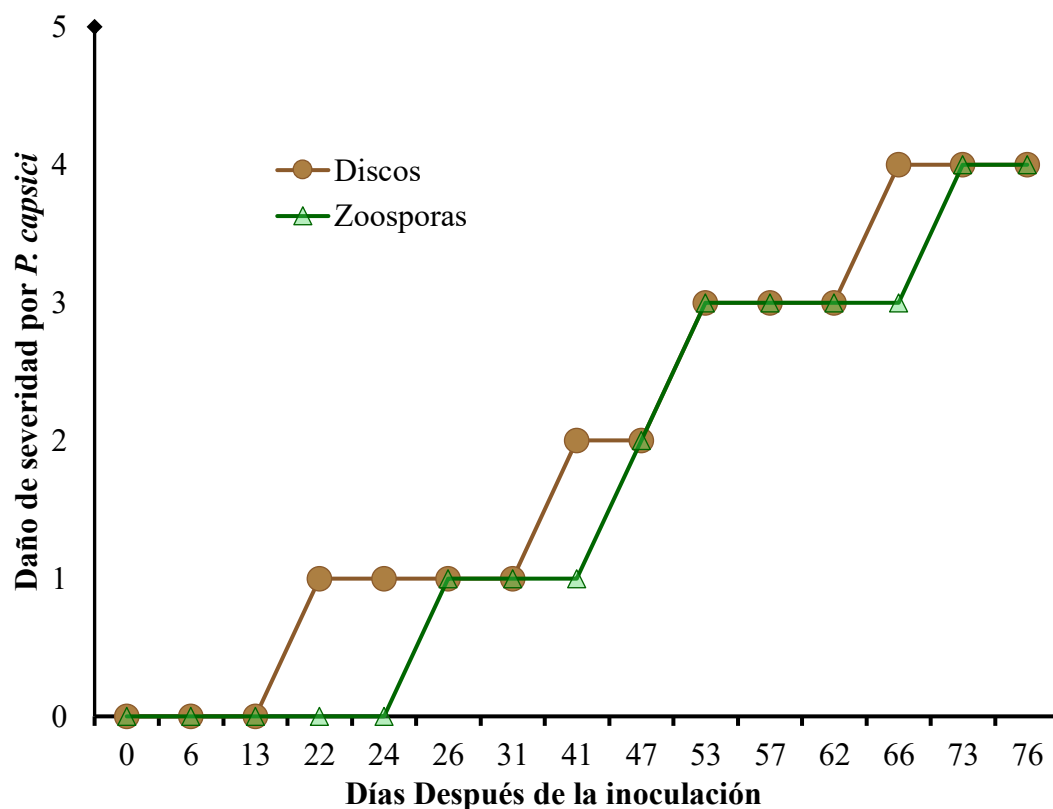


Figura 16. Comparación en el tiempo de las dos técnicas de inoculación de *P. capsici* en chile jalapeño.

La sintomatología presentada por el chile, fue la típica que presentan las plantas ante una infección por *P. capsici* (Fig. 15), se observaron síntomas característicos de marchitez y hojas cloróticas, lo que concuerda con los resultados de Andrade-Luna *et al.*, (2017), en su estudio, aplicaron tres niveles de inoculación de *P. capsici* en chayote y observaron que con un nivel de 1×10^5 zoosporas, las plantas presentaron síntomas de marchitez y muerte a los 5 y 7 ddi. En contraste, cuando aplicaron 3×10^5 zoosporas, los síntomas aparecieron desde los tres ddi, lo que atribuyeron a la necrosis en la zona de transición entre el tallo y las raíces, impidiendo la absorción de agua y nutrientes, llevando al deterioro de las plantas de chayote. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la concentración de zoosporas inoculadas, ya que influye en la rapidez con la que se manifiestan los síntomas.

Es importante establecer un protocolo de infección efectivo que garantice la infección por el patógeno y la manifestación de los síntomas típicos Delgadillo-Durán *et al.*, (2020), trabajaron con distintos métodos de infección de *P. palmivora* en plántulas de cacao, evaluó

dos distintos métodos de inoculación del patógeno (discos de agar y una solución de zoosporas) y menciona que el método más efectivo resultó la suspensión de zoosporas debido a que mantiene condiciones húmedas para penetrar el tejido y comenzar el proceso infeccioso; también menciona que el uso de discos al ser colocados puede ocasionar heridas lo que ocasionaría una respuesta de la planta al daño mecánico lo cual alteraría la sintomatología ocasionada por el patógeno. Concluyen que el uso de zoosporas es un método simple, eficiente, reproducible y genera una sintomatología típica esperada entre genotipos de cacao susceptibles y resistentes. En nuestro caso, el hecho de que el método por disco manifestara primero los síntomas pudo deberse a las condiciones de temperatura del invernadero que durante el ensayo se alcanzaron temperaturas superiores a los 32°C, lo cual no favorece la infección del patógeno. El hecho de manifestar síntomas más rápidamente por el método de disco, no garantiza que el daño ocasionado sea solamente por el patógeno o el ocasionado por algún daño mecánico al colocar el disco de micelio.

8.3.7.2. Interacción entre HMA y SiO₂ como bioprotectores en chile jalapeño contra *P. capsici*

En este estudio, se evaluó el efecto simple de la micorrización, la concentración de silicio y su interacción sobre el daño ocasionado a nivel foliar y en la raíz por parte de *P. capsici* en plantas de chile; los resultados por efecto de la micorrización no mostraron control de la severidad a nivel foliar (Fig. 17a), el daño provocado por el patógeno alcanzó el nivel 4 en la escala de severidad. Por otro lado, en el daño radicular en las plantas de chile jalapeño se observó que las plantas no micorrizadas obtuvieron un nivel de 2 en la escala; sin embargo, resultó estadísticamente similar a lo alcanzado en las plantas micorrizadas según la prueba de Kruskal-Wallis (Fig. 17b).

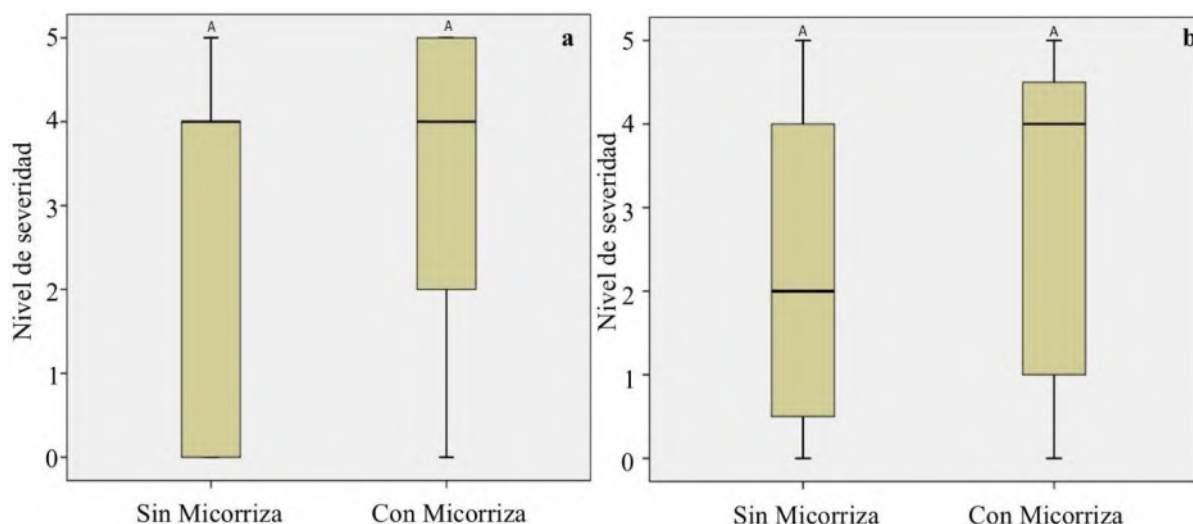


Figura 17. Efecto de la micorrización sobre el nivel de severidad en plantas de chile en follaje (a) y raíz (b).

Los resultados del daño ocasionado se pueden correlacionar con el efecto del factor micorrización sobre el crecimiento de las plantas de chile al final del experimento (Tabla 11), donde se encontró diferencia significativa sobre las variables de crecimiento evaluadas tales como altura, longitud de raíz, peso seco radicular y total que resultaron estadísticamente iguales y en promedio obtuvieron 23.02 cm, 27.00 cm, 2.33 g y 5.22 g respectivamente. La no respuesta a la micorrización al crecimiento pudo deberse a un costo fisiológico de la simbiosis micorrízica bajo condiciones de estrés biótico y donde parte de los recursos del hospedero podrían haberse direccionado a la activación de mecanismos de defensa; por otro lado, el daño radicular por *P. capsici* pudo limitar el efecto positivo de los HMA. Espinosa-Victoria *et al.*, (2004), mencionan que al micorrizar previamente las plántulas de chile var. Tres Lomos con *R. intraradices*, se promovió la modificación en el sistema radical y así disminuir el número de lesiones producidas por *P. capsici*, además de incrementar la actividad de las enzimas peroxidasa y catalasa, así como también en generar un efecto bioprotector y una supervivencia de las plántulas a un 100%. No obstante, Leos-Escobedo *et al.*, (2022), estudiando 23 genotipos de chile y a partir de los 28 ddi, el tratamiento a base de HMA, fue el más susceptible ante el ataque por *P. capsici*, siendo los cultivares: jalapeño (95%), puya (62.5%) y serrano (75%) más susceptibles. En este trabajo se empleó el cultivar

jalapeño, lo cual al ser susceptible era de esperarse no se encontró efecto de la micorrización con el consorcio de *R. intraradices* y *R. fasciculatum*.

Para el caso del factor concentración de silicio, si resultó significativo y hubo diferencia en la severidad del patógeno dependiendo de la concentración de silicio utilizada tanto en el follaje como en raíz (Fig. 18a y b).

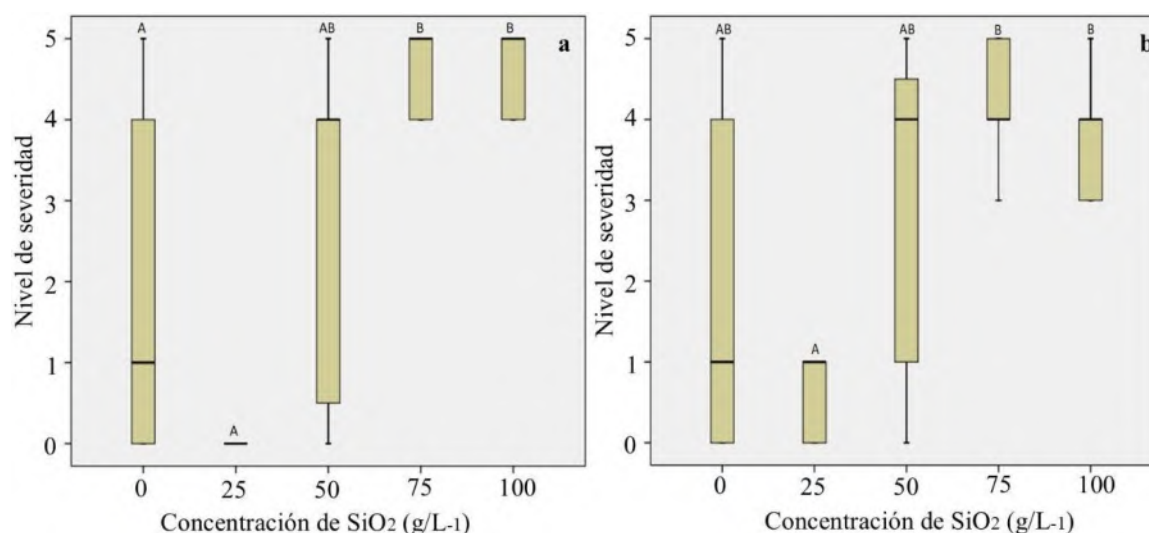


Figura 18. Efecto de las concentraciones de SiO₂ sobre el daño en el follaje (a) y radicular (b) de *P. capsici* en chile jalapeño.

Se pudo observar que la concentración de dióxido de silicio si presentó en las plantas de chile jalapeño un efecto protector contra *P. capsici* a una concentración de 25 y 50 gL⁻¹, sin embargo, solo resultó estadísticamente diferente a la concentración de 25 gL⁻¹ respecto a las demás concentraciones. Los mayores niveles de severidad se alcanzaron a concentraciones de 75 y 100 gL⁻¹ de dióxido de silicio. El daño puede corroborarse con los datos de crecimiento de las plantas de chile al final del experimento donde las plantas que fueron irrigadas con concentraciones entre 0 y 50 gL⁻¹, alcanzaron el mayor crecimiento en las variables evaluadas (Tabla 11), donde estadísticamente resultaron superiores al crecimiento alcanzado en las plantas de chile irrigadas con concentraciones de 75 y 100 gL⁻¹ de dióxido de silicio. La menor severidad encontrada junto con un incremento en el crecimiento por efecto del silicio en las plantas infectadas con el fitopatógeno, puede deberse a que el silicio confiere resistencia a múltiples estreses, cuanto más silicio se acumule en los

brotes, mayor es el efecto, pero varía dependiendo de la especie vegetal y de la capacidad de las raíces en absorberlo (Ma, 2004). Villalón-Mendoza *et al.*, (2018) mencionan que la fuente de dióxido de silicio tiene efectos positivos sobre el crecimiento y calidad de las plantas de chile piquín (*C. annuum* L. var. *grabriusculum*) y es una alternativa viable para la fertilización. Así como también para promover la defensa vegetal contra el ataque de insectos, hongos, bacterias y virus ya que el silicio mitiga el estrés biótico a largo plazo y se considera una estrategia ecológica integrada (Verma *et al.*, 2021 y Deb & Dutta, 2022). El silicio ha demostrado desempeñar un papel activo en la defensa vegetal mediante mecanismo más complejos que una simple barrera física. Rasoolizadeh *et al.*, (2020), observaron que, en plantas de soja, el silicio modifica el entorno molecular del apoplasto, limitando el desarrollo de *P. sojae*, mientras que en plantas que no contenía silicio el fitopatógeno forma haustorios en cuatro días. Esta observación se relaciona con nuestro estudio en chile jalapeño, donde los tratamientos con 25 gL⁻¹ de SiO₂, respondieron ante el impacto por *P. capsici* en el follaje (Fig. 18a) y por ende, esta concentración reforzó la respuesta fisiológica en la planta; no así en concentraciones mayores de silicio que mostraron mayor daño por el patógeno por lo que las concentraciones altas de SiO₂ suelen ser menos efectivas contra *P. capsici*, lo que deja en evidencia que también hubo una reducción drástica en la biomasa seca total en promedio de un 50.01%, lo cual indica un efecto negativo ante el exceso de SiO₂ en la planta de chile jalapeño. Para el caso del daño en la raíz, se encontró una respuesta similar a lo observado en la parte foliar (Fig. 18b); Lee *et al.*, (2004), observaron en microscopia óptica y electrónica de barrido que las plantas de chile que no fueron tratadas con silicio presentaron en las raíces una epidermis más delgada y lisa a diferencia con las plantas que se les agregó silicato de potasio, las cuales, encontraron una cera epidérmica más gruesa y la presencia de cuerpos de silicio, de esta forma brindan protección contra la infección por *P. capsici*, y además hubo aumento del peso seco de las raíces y el número de frutos. Así mismo, French-Monar *et al.*, (2010), menciona que suministrar silicio a las raíces de pimientos morrones puede reducir la gravedad de la enfermedad causada por *P. capsici* y, al mismo tiempo, mejorar el desarrollo de las plantas. Mismos resultados se han reportado en condiciones in vitro donde la adición de silicio en el medio de crecimiento inhibe el desarrollo del micelio de fitopatógenos como *P. cinnamomi*, *P. capsici*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Sclerotium rolfsii*, *Pythium F-group*, *Mucor pusillus*, *Drechslera spp*, *Fusarium oxysporum*, *F. solani*, *Alternaria solani*,

Colletotrichum coccodes, *Verticillium fungicola*, *Curvularia lunata* y *Stemphylium herbarum*, y podría ser utilizado como fungicida (Kaiser *et al.*, 2005). El mecanismo por el cual el silicio actúa como inductor de resistencia vegetal debido a que está relacionado con rutas de señalización del etileno y al ácido jasmónico acompañado de la producción de especies reactivas al oxígeno (ROS) y a la expresión de genes relacionados con la patogénesis (Xue *et al.*, 2021).

Tabla 11. Efecto de los factores estudiados y su interacción sobre el crecimiento del chile al final del experimento.

Factor	Altura (cm)	Diámetro (mm)	LR cm	PSPA g	PSR g	PST g	No. de hojas	No. de Botones	CM %
SHMA	24.6 a	5.4 a	27.9 a	3.2 a	2.3 a	5.6 a	52 a	14 a	0
HMA	21.3 a	4.6 b	26.0 a	2.5 b	2.2 a	4.8 a	44 b	11 b	22.9
0 gL ⁻¹	25.0 a	5.4 ab	27.3 a	3.2 a	2.5 ab	5.8 a	50 ab	13 b	35.6 a
25 gL ⁻¹	27.5 a	6.3 a	29.0 a	3.8 a	3.1 a	7.0 a	60 a	19 a	25.6 a
50 gL ⁻¹	25.5 a	5.5 ab	29.1 a	3.2 a	3.2 a	6.3 a	50 ab	14 b	21.1 a
75 gL ⁻¹	19.0 b	3.7 c	25.0 a	2.0 b	1.4 b	3.5 b	38 b	8 c	17.8 a
100 gL ⁻¹	17.9 b	4.1 bc	24.3 a	1.9 b	1.3 b	3.3 b	41 b	9 c	14.4 a
SM * 0 gL ⁻¹	28.7 ab	6.9 a	29.9 a	3.9 a	3.3 ab	7.2 ab	59 a	16 ab	0
SM * 25 gL ⁻¹	29.3 a	6.5 a	30.3 a	4.0 a	2.9 ab	7.0 ab	60 a	20 a	0
SM * 50 gL ⁻¹	23.7 abc	4.8 ab	29.0 a	2.8 ab	2.2 ab	5.0 abc	47 ab	12 ab	0
SM * 75 gL ⁻¹	21.9 abc	4.0 ab	25.4 a	2.6 ab	1.4 ab	4.0 abc	42 ab	11 ab	0
SM * 100 gL ⁻¹	19.7 bc	5.1 ab	25.1 a	2.6 ab	1.9 ab	4.5 abc	52 ab	14 ab	0
CM * 0 gL ⁻¹	21.3 abc	4.0 ab	24.7 a	2.5 ab	1.7 ab	4.3 abc	42 ab	9 bc	35.6 a
CM * 25 gL ⁻¹	25.8 ab	6.2 ab	27.7 a	3.6 a	3.3 ab	7.0 ab	61 a	19 ab	25.6 a
CM * 50 gL ⁻¹	27.4 ab	6.2 ab	29.3 a	3.6 a	4.0 a	7.7 a	53 ab	16 ab	21.1 a
CM * 75 gL ⁻¹	16.2 c	3.4 b	24.6 a	1.5 b	1.4 ab	3.0 bc	34 b	5 c	17.8 a
CM * 100 gL ⁻¹	16.1 c	3.2 b	23.6 a	1.3 b	0.7 b	2.1 c	30 b	4 c	14.4 a

LR; longitud de raíz, PSPA, peso seco de la parte aérea, PSR, peso seco de la raíz, PST; peso seco total, CM, colonización micorrízica. Letras distintas en medias por columna indican diferencia significativa (Tukey, $p < 0.05$).

Por otro lado, en aquellas concentraciones de 75 y 100 gL⁻¹ de SiO₂, el crecimiento se vio disminuido y los niveles de severidad incrementaron hasta alcanzar plantas muertas; esto puede sugerir que altas concentraciones de silicio tienen un efecto fitotóxico en la planta lo cual hace más factible la infección del fitopatógeno. Côté-Beaulieu *et al.*, (2009), mencionan que el ácido mono y trimetil silícico no ofrecieron protección contra el mildiú polvoroso en trigo y, de hecho, produjo niveles más altos de infección que el control y que el ácido dimetil silícico indujo síntomas graves de fitotoxicidad al inicio de los experimentos con concentraciones de solución nutritiva de tan solo 0,1 mM. Por su parte, tanto el ácido monometil silícico como el trimetil silícico también causaron síntomas de fitotoxicidad. Así

mismo, se han reportado que dosis de 540-1820 mgL⁻¹, de nanopartículas de sílice han mostrado efectos fitotóxicos sobre *Allium cepa* (Madanayake & Adassooriya, 2021).

Así mismo la concentración de silicio no afectó la colonización micorrízica al final del experimento y en promedio las plantas micorrizadas obtuvieron en promedio un 22.9 %, siendo el doble a cuando comenzaron a recibir las distintas concentraciones de silicio; lo cual indicaría que el silicio no afectó el proceso de colonización durante su aplicación.

Al analizar la interacción de los factores estudiados sobre el daño ocasionado por *P. capsici*, se puede observar un efecto significativo entre estos (Fig. 19a y b). Donde se encontró que, los niveles más bajos de severidad tanto a nivel foliar como radicular se encontraron en plantas irrigadas concentraciones de 0 y 25 gL⁻¹, en plantas no micorrizadas, los cuales resultaron estadísticamente inferiores al nivel de severidad alcanzado en concentraciones de 50 a 100 gL⁻¹, donde se encontraron plantas muertas. Sin embargo, cuando se encuentran micorrizadas las plantas no se mantiene este efecto pues a 0 gL⁻¹ de silicio se tuvo un daño por el patógeno tanto en follaje como en raíz, el cual es equiparable cuando las plantas micorrizadas fueron irrigadas con concentraciones de 75 y 100 gL⁻¹ de dióxido de silicio y las no micorrizadas a partir de los 50 gL⁻¹ tanto en follaje como en raíz.

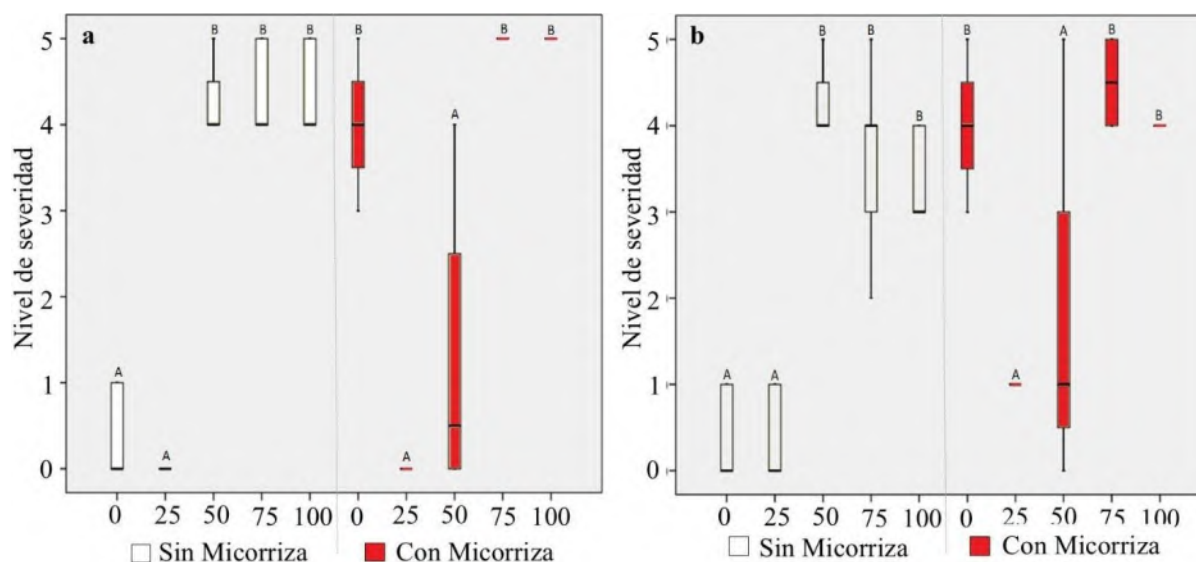


Figura 19. Efecto de la interacción de los factores (HMA y SiO₂) sobre el daño foliar (a) y radicular (b) de *P. capsici* en chile jalapeño.

Lo anterior deja en evidencia que las plantas micorrizadas y con concentraciones altas de SiO₂ tienen menos efectividad a condiciones de estrés del tipo biótico debido a la alta concentración de silicio, lo cual deja a las plantas más susceptibles al ataque del fitopatógeno. Por otro lado, se observó que plantas micorrizadas y con dosis altas de silicio obtienen un menor crecimiento que plantas no micorrizadas o micorrizadas pero con dosis bajas de silicio (tabla 11).

Los tratamientos donde se utilizaron dosis entre 25 y 50 gL⁻¹, ya sea estuvieran o no micorrizadas las plantas, fue donde se registraron los valores más altos en las variables de crecimiento evaluadas tales como, altura, diámetro del tallo, peso seco total y número de hojas y botones; mientras que en CM * 100 gL⁻¹, se registró el menor crecimiento. Esto estuvo probablemente relacionado a la severidad de daño por *P. capsici* (tabla. 12). No obstante, a nivel reproductivo, se observó que los tratamientos con menor severidad presentaron un mayor número de botones florales, lo que podría atribuirse a que esta infección por el patógeno induzca a esta expresión. Se tiene reportes que la interacción silicio y HMA, controla la severidad de fitopatógenos como lo reportado por Gbongue *et al.*, (2019), donde reportan que plantas de banano colonizadas por HMA cultivadas en un sustrato suplementado con Si, fueron menos dañadas por *Pseudocercospora fijiensis* que las plantas no colonizadas cultivadas sin Si agregado al sustrato de crecimiento.

Tabla 12. Aspecto de plantas de chile micorrizadas y no micorrizadas suplementadas con distintas concentraciones de dióxido de silicio e infectadas con *P. capsici*.

Conc. de SiO ₂	Sin Micorriza	Con Micorriza
0 gL ⁻¹		
25 gL ⁻¹		
50 gL ⁻¹		
75 gL ⁻¹		
100 gL ⁻¹		

8.3.8. Conclusión

La comparación entre los métodos de inoculación por discos de micelio y zoosporas en plantas de chile jalapeño reveló que ambas técnicas provocaron síntomas característicos de infección por *P. capsici*, aunque con diferencias en el tiempo de aparición. El método por disco mostró síntomas más tempranos (17 ddi) que el de zoosporas (26 ddi), posiblemente por la introducción directa de estructuras fúngicas en crecimiento activo que aceleran la

infección. Sin embargo, esta rapidez no implica eficacia, ya que pueden influir factores mecánicos o las condiciones ambientales como temperatura fluctuante durante el ensayo. Las zoosporas, por su parte, requieren señales químicas específicas para germinar y alcanzar los tejidos vegetales, lo que retrasa el inicio de la infección, pero refleja una vía más cercana al proceso natural de transmisión en campo. Por lo tanto, la elección del método de inoculación debe considerar no solo la rapidez de la manifestación de síntomas, sino también la representatividad ecológica y las implicaciones experimentales asociadas

Los resultados obtenidos evidenciaron que la concentración de 25 gL⁻¹ de SiO₂ fue la concentración óptima para maximizar el crecimiento, desarrollo y tolerancia del cultivo jalapeño tanto para plantas micorrizadas como las no micorrizadas. Esto se corrobora con su crecimiento que fue mayor respecto a plantas con dosis de silicio más altas, por lo que, a concentraciones a partir de 50 gL⁻¹ hubo una disminución en el crecimiento, debido probablemente a un efecto tóxico del silicio que incrementó la susceptibilidad de las plantas a la infección por el patógeno.

Así mismo en el tratamiento SM * 25 gL⁻¹, fue el único que se mantuvo en el nivel cero de la escala de severidad catalogado como planta sana, mientras que en el tratamiento CM * 100 gL⁻¹, alcanzó un nivel de marchitez severa e inclusive algunas plantas muertas. Esto refuerza que el SiO₂ en concentraciones intermedias no solo promueve el crecimiento vegetal en el cultivar jalapeño sino que contribuye a la tolerancia con la enfermedad, inclusive cabe destacar que aunque hay registros de baja incidencia de daño en algunos tratamientos y que no se haya observado en la raíz un colapso total del sistema radical así como también de observarse que los síntomas de la enfermedad tardaron en manifestarse hace atribuir que el nivel de marchitez observado responde a las condiciones experimentales y al efecto de una elevada concentración de SiO₂ y la interacción con los HMA, así como la resistencia o vulnerabilidad genética del cultivar jalapeño.

8.3.9. Literatura consultada

- Ahammed, G. J. & Yang, Y. (2021). Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 200-206. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.05.031
- Álvarez, A., Oliveros, D., Ávila, Y. C., Sabogal Palma, A. C., Murillo, W., Joli, J. E., ... & Guarnizo, N. (2023). Resistance induction with silicon in Hass avocado plants inoculated with *Phytophthora cinnamomi* Rands. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2178362.
- Andrade-Luna, M. I., Espinosa-Victoria, D., Rodríguez-Gómez, O., Cadena-Iñiguez, J., Arévalo-Galarza, M. de L., Trejo-Téllez, L. I. & Delgadillo-Martínez, J. (2017). Severidad de una cepa de *Phytophthora capsici* en plantas de chayote *Sechium edule* a nivel de cámara de crecimiento. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 35(1):40-57. DOI: 10.18781/r.mex.fit.1607-3
- Cárdenas, R. J., Yáñez, J. M. G., López, O. C. A., Ayala, T. F., López, U. G. A. & Romero, G. S. de J. (2021). Especies de *Phytophthora* asociadas a agua de irrigación en el Valle de Culiacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3):
- Côté-Beaulieu, C., Chain, F., Menzies, J. G., Kinrade, S. D., & Bélanger, R. R. (2009). Absorption of aqueous inorganic and organic silicon compounds by wheat and their effect on growth and powdery mildew control. *Environmental and experimental botany*, 65(2-3), 155-161.
- Chaube, H. S. & Pundhir, V.S. (2022). Crop diseases and their management. PHI Learning Private Limited, Delhi,
- Dukare, A., Sangeeta, P., Priyank, M. & Divekar, P. (2021). Biological disease control agents in organic crop production system. En: Mehmood, M. A., Hakeem, K. R., Bhat, R. A. & Dar, G.H. (Eds.). (2021). Pesticide Contamination in Freshwater and Soil Environs: Impacts, Threats, and Sustainable Remediation (1st ed.). Apple Academic Press. DOI: 10.1201/9781003104957
- Deb, L. & Dutta, P. (2022). Biogenic role of silicon in abiotic and biotic stress management in plants. *J Mycol Pl Pathol*, 52(2):103-122

- Delgadillo-Durán, P., Soto-Suárez, M., Rodríguez-Polanco, L., Carrero-Gutierrez, M., Torres-Rojas, E., & Yockteng, R. (2020). A new method for the inoculation of *Phytophthora palmivora* (Butler) into cacao seedlings under greenhouse conditions. *Plant Methods*, 16, 1-7.
- Espinosa-Victoria, D., González-Mendoza, D., Placencia-de la Parra, J. & García-Espinosa, R. (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(3):317-326. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57322308>
- Etesami, H., Li, Z., Maathuis, F. J., & Cooke, J. (2022). The combined use of silicon and arbuscular mycorrhizas to mitigate salinity and drought stress in rice. *Environmental and Experimental Botany*, 201, 104955.
- Fauteux, F., Rémus-Borel, W., Menzies, J. G. & Bélanger, R. R. (2005). Silicon and plant disease resistance against pathogenic fungi. *FEMS Microbiology Letter*, 249, 1-6. 10.1016/j.femsle.2005.06.034
- French-Monar, R. D., Rodrigues, F. A., Korndörfer, G. H., & Datnoff, L. E. (2010). Silicon suppresses *Phytophthora* blight development on bell pepper. *Journal of Phytopathology*, 158(7-8), 554-560.
- Gbongue, L. R., Lalaymia, I., Zeze, A., Delvaux, B., & Declerck, S. (2019). Increased silicon acquisition in bananas colonized by *Rhizophagus irregularis* MUCL 41833 reduces the incidence of *Pseudocercospora fijiensis*. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1977.
- Glosier, B. R., Ogundiwin, E. A., Sidhu, G. S., Sisco, D. R. & Prince, J. P. (2008). A differential series of pepper (*Capsicum annuum*) lines delineates fourteen physiological races of *Phytophthora capsici*. *Euphytica*, 162:23-30. DOI: 10.1007/s10681-007-9532-1
- González-Tobón, J., Childers, R. R., Rodríguez, A., Fry, W., Myers, K. L., Thompson, J. R., ... & Danies, G. (2022). Searching for the mechanism that mediates mefenoxam-acquired resistance in *Phytophthora infestans* and how it is regulated. *Phytopathology*®, 112(5), 1118-1133.
- Grageda, G. J., Ruiz, C. J. A., Jiménez, L. A. & Fu, C. A. A. (2014). Influencia del cambio climático en el desarrollo de plagas y enfermedades de cultivos en Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(10),1913-1921.

- https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S2007-09342014001401913&lng=es
- Hohmann, P. & Messmer, M. (2017). Breeding for mycorrhizal symbiosis: focus on disease resistance. *Euphytica*, 213:113. DOI: 10.1007/s10681-017-1900-x
- Izquierdo, J. & Granados-Ortiz, S. (2011). Manual técnico. Producción artesanal de semillas de hortalizas para la huerta familiar. FAO. Santiago Chile. Pp: 98.
- Kaiser, C., Van der Merwe, R., Bekker, T. F., & Labuschagne, N. (2005). In-vitro inhibition of mycelial growth of several phytopathogenic fungi, including *Phytophthora cinnamomi* by soluble silicon. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 28(1), 70-74.
- Khlar, S. B., Omer, A. & Teweldemedhin, B. (2018). Medicinal uses and health benefits of chili pepper (*Capsicum* spp.): a review. *MOJ Food Processing & Technology*, 6(4): 325-328. DOI: 10.15406/mojfpt.2018.06.00183
- Kostic, I., Nikolic, N., Milanovic, S., Milenkovic, I., Pavlovic, J., Paravinja, A., & Nikolic, M. (2023). Silicon modifies leaf nutriome and improves growth of oak seedlings exposed to phosphorus deficiency and *Phytophthora plurivora* infection. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1265782.
- Lee, J. S., Seo, S. T., Wang, T. C., Jang, H. I., Pae, D. H. & Engle, L. M. (2004). Effect of Potassium silicate amendments in Hydroponic nutrient solution on the suppressing of *Phytophthora* Blight (*Phytophthora capsici*) in pepper, *Plant Pathol. J.*, 20(4):277-282.
- Leos-Escobedo, L., García-Carrillo, M., Delgadillo-Martínez, J., Valenzuela, G., A. A., Anulo-Castro, A., Preciado-Rangel, P. & Rueda, P. E. O. (2022). Consorcios de hongos micorrízicos y rizobacterias en el control biológico de *Phytophthora capsici* en cultivares de *Capsicum annuum*. *Biotechnia*, 24(1):30-37.
- Ma, F. J. (2004). Role of silicon in enhancing the sistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1):11-18. DOI: 10.1080/00380768.2004.10408447
- Madanayake, N. H., & Adassooriya, N. M. (2021). Phytotoxicity of nanomaterials in agriculture. *The Open Biotechnology Journal*, 15(1).

- McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L. & Swan, J. A. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New phytologist*, 115(3): 495-501. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x
- Moreira-Morrillo, A. A., Monteros-Altamirano, A., Reis, A. & Garcés-Fiallos, F. R. (2023). Chapter: *Phytophthora capsici* on *Capsicum* plants: a destructive pathogen in chili and pepper crops. En Bayle, B. Y. O. (Ed.). *Capsicum Current Trends and Perspectives*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.98137
- Narayanasamy, P. (2013). Chapter 2 Detection and identification of fungal biological control agents. En: Narayanasamy, P. (Ed.) *Biological Management of Diseases of Crops*. Volume 1: Characteristics of Biological Control Agents. Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Pandey, R., Singh, C., Mishra, S., Abdulraheem, M. I. & Vyas, D. (2024). Silicon uptake and transport mechanisms in plants: processes, applications and challenges in sustainable plant management. *Biologia Futura*, 79,19-31. DOI: 10.1007/s42977-024-00247-x
- Parada-Rojas C. H., Granke, L. L., Naegle, R. P., Hansen, Z., Hausbeck, M. K., Kousik, C. S., McGrath, M. T., Smart, C. D. & Quesada-Ocampo, L. M. (2021). A Diagnostic Guide for *Phytophthora capsici* Infecting Vegetable Crops. *Plant Health Progress* 2021 22:3, 404-414.
- Phillips, J. M. & Hayman, D. A. (1970). Improved Procedures for Clearing Roots and Staining Parasitic and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Rapid Assessment of Infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55, 158-161. DOI: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3
- Qiu, L.-X., Guan, D.-X., Liu, Y.-W., Teng, H. H., Li, Z.-B., Lux, A., Kuzyakov, Y., & Ma, L. Q. (2024). Mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi increasing silicon uptake by rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(30), 16603-16613. DOI: 10.1021/acs.jafc.4c01487
- Rangaswami, G. & Mahadevan, A. (2006). *Diseases of crop plants in india*. 4 ed. Prentice-Hall of India Private Limited,
- Rasoolizadeh, A., Santhanam, P., Labbé, C., Shivaraj, S. M., Germain, H. & Bélanger, R. R. (2020). Silicon influences the localization and expression of *Phytophthora sojae*

- effectors in interaction with soybean, *Journal of Experimental Botany*, 71(21):6844-6855. DOI: 10.1093/jxb/eraa101
- Reyes, T. A. (2020). *Análisis fenotípico y genómico de aislados de Phytophthora capsici del centro de México, y su interacción con cultivares de chile (Capsicum annuum)*. [Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
- Reyes-Tena, A., Rodríguez-Alvarado, G., Fernández-Pavía, S. P., Pedraza-Santos, M., Larsen, J. & Vázquez-Marrufo, G. (2021). Caracterización morfológica de aislados de *Phytophthora capsici* provenientes de Jalisco y Michoacán, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39(1):75-93. DOI: 10.18781/r.mex.fit.2007-5
- Ritchie, G. A., Landis, T. D., Katen, D. R. & Haase, D. L. (2004). Manual de viveros para la producción de especies forestales en contenedor. Volumen 7. Capítulo 2. Evaluación de la calidad de la planta. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
- Sánchez-Gurrola, C., Gómez-Dorantes, N., Rodríguez-Alvarado, G. & Fernández-Pavía S. P. (2019). Variabilidad morfológica y sensibilidad de *Phytophthora capsici* causando marchitez en chile pimiento morrón en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 11(8):65-71. DOI: 10.29312/remexca.v11i8.2618
- Singhal, R. K., Fahad, S., Kumar, P., Choyal, P., Javed, T., Jinger, D., Singh, P., Saha, D., MD, P., Bose, B., Akash, H., Gupta, N.K., Sodani, R., Dev, D., Lal, S. D., Liu, K., Harrison, M. T., Saud, S., Noor, S. A. & Nawaz, T. (2022). Beneficial elements: New Players in improving nutrient use efficiency and abiotic stress tolerance. *Plant Growth Regulation*, 100, 237-265. DOI: 10.1007/s10725-022-00843-8
- Sonogo, S., Lamour, K., Kousik, C. S., Lozada, D. N., Parada-Rojas, C. H., Quesada-Ocampo, L. M., Wyenandt, C. A., Babadoost, M., Hausbeck, M. K., Hansen, Z., Ali, E., McGrath, M. G., Hu, J., Crosby, K. & Miller, S. A. (2023). *Phytophthora capsici*, 100 years later: research mile markers from 1922 to 2022. *Phytopathology*, 113(6):921-930. DOI: 10.1094/PHYTO-08-22-0297-RVW
- Suárez, A. S., Di P. M. A., Cardozo, P. G. & Travaglia, C. N. (2022). Técnicas de histología vegetal: un bordaje para su utilización en microscopía óptica. Río Cuarto: Un Río Editora, pp: 40.

- Verma, K. K., Song, X. P., Tian, D. D., Guo, D. J., Chen, Z. L., Zhong, C. S., Nikpay, A., Singh, M., Rajput, V. D., Singh, R. K. (2021). Influence of silicon on biocontrol strategies to manage biotic stress for crop protection, performance, and Improvement. *Plants*, 10, 2163. DOI: 10.3390/plants10102163
- Villalón-Mendoza, H., Castillo-Villarreal, M. A., Garza-Ocañas, F., Guevara-González, J. A. & Sanchez-Castillo, L. (2018). Dióxido de silicio como estimulante del índice de calidad de plantas de chile piquín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) producidas en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50) DOI: 10.29298/rmcf.v9i50.247
- Weather Spark,. (2024). Datos históricos meteorológicos de la primavera 2024 en Morelia, México. <https://es.weatherspark.com/h/s/4452/2024/0/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-la-primavera-2024-en-Morelia-M%C3%A9xico>
- West, P. van., Appiah, A. A. & Gow, N. A. R. (2003). Advances in research on oomycete root pathogens. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 62:99-113. DOI: 10.1016/s0885-5765(03)00044-4
- Xue, X., Geng, T., Liu, H., Yang, W., Zhong, W., Zhang, Z., & Chu, Z. (2021). Foliar application of silicon enhances resistance against *Phytophthora infestans* through the ET/JA-and NPR1-dependent signaling pathways in potato. *Frontiers in Plant Science*, 12, 609870.
- Zapata-Vázquez, A., Sánchez-Sánchez, M., del-Río-Robledo, A., Silos-Espino, H., Perales-Segovia, C., Flores-Benítez, S., González-Chavira, M. M. & Valera-Montero, L. L. (2012). *Phytophthora capsici* epidemic dispersión on comercial pepper fields in Aguascalientes, México. *The Scientific World Journal*. DOI: 10.1100/2012/341764.
- Zhang, X., Ma, X., Wang, S., Liu, S. & Shi, S. (2024). Physiological and Genetic Aspects of Resistance to Abiotic Stresses in *Capsicum* Species. *Plants*, 13, 3013. 3. DOI: 10.3390/plants13213013.
- Zia, U. U., Niazi, A. R., Ahmad, Z., Alharby, H. F., Waraich, E. A., Abbasi, A., ... & Hina, S. (2023). Dose optimization of silicon for boosting arbuscular mycorrhizal fungi colonization and cadmium stress mitigation in maize (*Zea mays* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(25), 67071-67086.

IX. Discusión general

Este trabajo de tesis, se centra en dos estrategias agrícolas sostenibles que actualmente han tomado relevancia en el ámbito de la agricultura sostenible: la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y la aplicación del elemento químico silicio (SiO₂), para mejorar el crecimiento y la bioprotección del cultivo de chile jalapeño frente al fitopatógeno *Phytophthora capsici*, una de las principales enfermedades que ataca el cultivo.

Para esto, primero se seleccionó el cultivar de *Capsicum* spp., donde se evaluarían los HMA y el silicio (Si). Los resultados revelaron una variabilidad en la susceptibilidad a la colonización micorrízica entre diferentes cultivares de *Capsicum* spp. A pesar de la inoculación con *R. intraradices* y *R. fasciculatum*, la emergencia de las plántulas y la presencia de estructuras micorrízicas variaron significativamente. El cultivar jalapeño fue el que presentó la mejor emergencia y colonización, incluyendo la presencia de arbusculos, que son las estructuras clave para el intercambio de nutrientes con el hospedero. Por el contrario, cultivares como el "caribe" y el "güero" no mostraron emergencia alguna bajo las condiciones del experimento. Estos hallazgos son cruciales porque demuestran que la respuesta a la micorrización no es uniforme y está influenciada por factores genéticos y ambientales, el tipo de sustrato o sistema (Sensoy *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2009; Hernádi & Posta, 2013 y Gutiérrez, 2016). La ausencia de arbusculos en el cultivar habanero y la baja presencia de hifas sugieren que la interacción micorrízica en este cultivar es menos efectiva. Este resultado refuerza la idea de que, para optimizar el uso de los HMA, es indispensable considerar el genotipo del cultivo, las condiciones ambientales, y las técnicas de inoculación.

Después, bajo condiciones hidropónicas, se evaluó el momento de inoculación con HMA (al trasplante vs en la siembra) y la aplicación de diferentes concentraciones de SiO₂ (0, 50 y 100 g·L⁻¹). Los resultados mostraron que la micorrización no tuvo un efecto significativo en las variables de crecimiento como la altura, el diámetro del tallo o el número de hojas y flores. La inoculación de HMA en la siembra (MS), resultó en una disminución del peso fresco y seco de la parte aérea y la raíz, en comparación con las plantas sin micorriza (SM) o las micorrizadas al trasplante (MT). Esto sugiere un posible efecto negativo o una fase de establecimiento más lenta del hongo que demanda recursos de la planta en sus etapas

iniciales, al tipo de sustrato empleado o a la fertirrigación (Palencia *et al.*, 2013; Abarca Gómez, 2020). En cambio, la micorrización al trasplante (MT) brindó efectos positivos durante en el tiempo y al final del experimento, perfilando este momento como el más efectivo que permitió optimizar el crecimiento del chile jalapeño.

En contraste, el SiO₂ mostró un efecto positivo significativo. La concentración de 50 g·L⁻¹ fue la más favorable para el crecimiento de las plantas, especialmente en aquellas micorrizadas al trasplante. Sin embargo, el estudio también reveló un posible efecto fitotóxico a concentraciones elevadas (100 g·L⁻¹), donde se observó daño en las plantas, como un anillamiento en la base del tallo. Este hallazgo es de vital importancia, ya que delimita un rango óptimo para la aplicación de silicio y alerta sobre los riesgos de concentraciones superiores, confirmando que la dosis es un factor crítico en la respuesta vegetal.

La interacción entre el uso de los HMA y la aplicación de las distintas concentraciones de SiO₂ en plantas de chile jalapeño, mostró una respuesta diferenciada según la variable respuesta evaluada. En particular, la altura de la planta mostró una respuesta significativamente superior en aquellos tratamientos micorrizados desde el trasplante y combinados con 50 gL⁻¹ de silicio, manteniéndose favorable a lo largo del experimento. En contraste, las variables como el diámetro del tallo, el número de hojas y número de botones presentaron incrementos en plantas sin micorriza y tratadas con 50 gL⁻¹ de silicio, mientras que las plantas micorrizadas desde el trasplante respondieron positivamente a la concentración de 25 gL⁻¹. Estos resultados sugieren que la micorrización al trasplante es más eficiente bajo condiciones mínimas de SiO₂, lo cual, optimiza el desarrollo vegetativo y reproductivo de las plantas de chile jalapeño, sin inducir efectos adversos como los señalados para las concentraciones máximas (50 a 100 gL⁻¹), siendo que los HMA se vean comprometidos debido al exceso de silicio.

Finalmente, se evaluó la interacción de los HMA y el SiO₂ como una estrategia de bioprotección contra el patógeno *P. capsici*. Los resultados encontrados no reflejaron una ventaja significativa de la micorrización en la reducción de la severidad de la enfermedad. Las plantas con y sin HMA mostraron una severidad similar, lo que contradice las expectativas iniciales y los reportes de otros estudios donde los HMA han actuado como

agentes de control biológico. Esto podría deberse a la cepa de hongo utilizada, al genotipo del chile o a las condiciones específicas del experimento. Por otro lado, la aplicación de dióxido de silicio sí mostró un efecto protector. Una concentración intermedia de 25 g·L⁻¹ optimizó tanto el crecimiento como la tolerancia de las plantas frente al fitopatógeno. Este resultado es crucial, ya que el Si parece inducir mecanismos de defensa en la planta, mejorando su capacidad para resistir la infección ya que el silicio modifica el entorno molecular del apoplasto, refuerza la respuesta fisiológica y genera una epidermis radicular más gruesa y protección con el fitopatógeno (Rasoolizadeh *et al.*, 2020; Verma *et al.*, 2021; Deb y Dutta, 2022). Sin embargo, no se encontró un efecto sinérgico claro entre los HMA y el silicio para la promoción del crecimiento o el control de *P. capsici*. Bajos de severidad se presentaron en plantas no micorrizadas e irrigadas con 0 a 25 gL⁻¹ y este efecto no se observó en plantas micorrizadas donde el daño fue similar a lo indicado en concentraciones máximas, a pesar que la concentración de SiO₂ no afectó la colonización micorrízica teniendo en promedio el 22% y el doble respecto al inicio de la aplicación del elemento benéfico, esto es debido a que la combinación de micorrización y altas dosis de silicio reduce la efectividad de los HMA frente al estrés biótico y abiótico, lo que afecta el desarrollo de la planta y vulnera la susceptibilidad al fitopatógeno.

Esto sugiere que, al menos bajo las condiciones de este estudio, los dos factores actúan de manera independiente, y no potencian mutuamente sus beneficios como se esperaba.

X. Conclusiones generales

La variabilidad en la emergencia, la colonización y estructuras micorrízicas entre cinco cultivares de *Capsicum* spp., se evidenció que el cultivar jalapeño mostró mayores valores en eficiencia de la simbiosis y por la presencia de arbusculos, lo que justifica su selección para la investigación del proyecto.

El momento que resultó efectivo para inocular HMA en plantas de chile jalapeño es al trasplante, pues se alcanzan los mayores crecimientos de la planta.

A concentraciones de silicio de 25 y 50 gL⁻¹, se promovió el crecimiento vegetal y reproductivo mientras que a concentraciones superiores de 75 y 100 gL⁻¹ retrasó el desarrollo y hubo disminución de la biomasa seca, así como también la aparición de daño en la base del tallo, lo cual, conllevó a la pérdida de estabilidad de la planta ante el movimiento.

La interacción entre los HMA y las concentraciones de SiO₂ en el crecimiento de las plantas de chile jalapeño es que al micorrizar al trasplante y aplicar concentraciones de 25 gL⁻¹ de SiO₂ existen efectos positivos tanto en crecimiento y reproductivos por lo que al aplicar concentraciones altas (≥ 50 gL⁻¹), se reduce la eficacia de la colonización micorrízica y a su vez afecta el desarrollo de la planta, lo que podría influir a condiciones de estrés en la asociación simbiótica y a la vulnerabilidad a factores de estrés tanto biótico y abiótico.

En el caso de los HMA y las concentraciones de SiO₂ frente a *P. capsici*, se concluye que la micorrización no mostró efecto protector significativo en contraste con el silicio el cual a 25 gL⁻¹ las plantas de chile jalapeño no presentaron síntomas de daño por severidad tanto en follaje y raíz, de tal manera que en las concentraciones superiores los daños fueron muy evidentes.

Bajo las condiciones de este estudio, los dos factores actúan de manera independiente, y no potencian mutuamente sus beneficios como se esperaba.

XI. Perspectivas y recomendaciones

1. Se sugiere el uso de consorcios micorrízicos multiespecíficos a monoespecíficos, ya que podría mejorar la infectividad y equilibrio en la simbiosis bajo condiciones hidropónicas en invernadero.
2. Considerar en aplicar el SiO₂ de forma no frecuente y en concentraciones previamente evaluadas sobre las variables respuesta a lo largo del tiempo.
3. Rastrear la presencia de endófitos oscuros a lo largo del experimento y considerando como posibles fuentes el inóculo micorrízico, el dióxido de silicio, el sustrato del cultivo e incluso las plántulas del cultivar jalapeño.

XII. Bibliografía complementaria

- Abarca, A. X. & Gómez, Z. S. E. (2020). Efecto de la inoculación de micorrizas benéficas Mycoral® en patrones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la etapa de desarrollo vegetal. [Tesis de licenciatura no publicada]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/8f99c2b8-e656-4a85-8797-9b1f8ca67f13/content>
- Acevedo, F. B. M. (2020). Efecto de micorriza (*Rhizophagus intraradices* N. C. Schenck & G. S. Sm.) y dos especies de *Trichoderma* en el manejo del mal seco (*Pythium myriotylum* Dreschsler) en quequisque (*Xanthosoma violaceum* (L.) Schott), San Carlos, Río San Juan, 2016. [Tesis de Grado]. Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/4154>
- Aguilar-Rincón, V. H., Corona, T. T., López, L. P., Latournerie, M. L. Ramírez, M. M., Villalón, M. H. & Aguilar, C. J. A. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, it-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.
- Aguirre-Mancilla, C. L., Iturriaga de la Fuente, G., Ramírez-Pimentel, J.G., Covarrubias-Prieto, J., Chablé-Moreno, F. & Raya-Pérez, J.C. (2017). El chile (*C. annuum* L.), cultivo y producción de semilla. *Ciencia y Tecnol. Agrop. México*, 5(1): 19-27. https://www.somecta.org.mx/Revistas/2017-1/2017-1/Art_REV_Mns_EL%20CHILE.pdf
- Altuntas, O. (2021). Chapter. Production of Vegetable Crops by Using Arbuscular Mycorrhizae. En: Radhakrishnan, R. Mycorrhizal Fungi. Utilization in Agriculture and Forestry. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.97552
- Alvarado, C. M., Díaz, F.A. & Peña Del R., M. De Los A. (2014). Productividad de tomate mediante micorriza arbuscular en agricultura protegida. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3):1-6.
- Álvarez, A., Oliveros, D., Ávila, Y. C., Sabogal Palma, A. C., Murillo, W., Joli, J. E., & Guarnizo, N. (2023). Resistance induction with silicon in Hass avocado plants

- inoculated with *Phytophthora cinnamomi* Rands. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2178362.
- Andrade-Torres, A. (2010). Micorrizas: antigua interacción entre plantas y hongos. *Revista Ciencia*, 61(4):84-90.
- Armenta-Bojórquez, A. D., C. García-Gutiérrez, J. R. Camacho-Báez, M. A. Apodaca Sánchez, L. Gerardo-Montoya & E. Nava-Pérez. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, 6(1):51 – 56.
- Barrantes, J. L. F. (2010). Manual de recomendaciones en el cultivo de chile, pimentón o ají (*Capsicum* sp.). Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. San José Costa Rica. <http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/00/00380-manualchile.pdf>
- Balog A., H. Loxdale, J. Bálint, K. Benedek, K. Szabó, K. Jánosi-Rancz, & E. Domokos. (2017). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* affects arthropod colonization on sweet pepper in both the field and greenhouse. *Journal of Pest Science*, 90: 935-946.
- Bhatla, S. C. & Lal, M. A. (2018). *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. DOI: 10.1007/978-981-13-2023-1
- Bijalwan, P., Jeddi, K., Saini, I., Sharma, M., Kaushik, P. & Hessini, K. (2021). Mitigation of saline conditions in watermelon with mycorrhiza and silicon application. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28:3678-3684. DOI: 10.1016/j.sjbs.2021.05.019
- Bonilla, I. (Ed.). (2013). Capítulo 6. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. En J. Azcón-Bieto & M. Talón (Coords.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. (pp. 103-119). McGraw Hill Interamericana.
- Breydo, L. (2013). Silicio, compuestos biológicamente activos. En: Kretsinger, R.H., Uversky, U.V., Permyankov, E.A. (Eds.). *Enciclopedia de metaloproteínas*. Springer, Nueva York. DOI: 10.1007/978-1-4614-15336_486

- Britannica, T. Editores de la Enciclopedia. (2023). *Silicio*. Enciclopedia Británica. <https://www.britannica.com/science/silicon>
- Caamal-Chan, M. G., Loera-Muro, A., Barraza, A. & Hernández, M. L. G. (2024). Los hongos y oomycetos, habitantes naturales del suelo: ¿Amigos o enemigos de las plantas?. *Recursos Naturales y Sociedad*, 10(2):89-105. DOI: 10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0008
- Camargo-Ricalde, S. L., N. M. Montaña, C. J. De La Rosa-Mera & S. A. Montaña A. (2012). Micorrizas: una gran unión debajo del suelo. *Revista Digital Universitaria*, 13(7): 3 – 19.
- Cano, M. A. (2011). Interacción de microorganismos benéficos en plantas: micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas*. Una revisión. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 14(2):15-31.
- Carballar-Hernández S., L.V. Hernández-Cuevas, N.M. Montaña, R. Ferrera-Cerrato, & A. Alarcón. (2018). Species composition of native arbuscular mycorrhizal fungal consortia influences growth and nutrition of poblano pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Applied Soil Ecology*, 130: 50-58.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S. & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botánica Mexicana*, 129: e1938. DOI: 10.21829/abm129.2022.1932
- Castellanos, G. L., R. De Mello P. & C. N. Silvia C. (2015). El silicio en la resistencia de los cultivos. *Cultivos Tropicales*, 36 (supl.1), 16 - 24.
- Castillo, C. G., Ortiz, C. A., Borie, F. R. & Rubio, R. E. (2009). Respuesta de ají (*Capsicum annuum* L.) cv. “Cacho de Cabra” a la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares. *Información Tecnológica*, 20(4):3-14. DOI: 10.1612/inf.tecnol.4067it.08
- Chang, R. & Overby, J, K. A. (2019). *Chemistry* (13th ed.). McGraw-Hill Education.

- Coutiño-Puchuli, A. E., Peña-Borrego, M. D. & Infante-Jiménez, Z. T. (2023). Estudio bibliométrico sobre biofertilizantes en México durante el periodo 2015 – 2020. *Terra Latinoamericana*, 41,1-14. e1449. DOI: 10.28940/terra. v41i0.1449
- Cristóbal-Alejo, J., Ramos-Zapata, J. A., Basto-Pool, C. & Herrera-Parra, E. (2021). Hongos micorrízicos arbusculares como control biológico del nematodo agallador (*Meloidogyne* spp.) en hortalizas de Yucatán. *Bioagrobiencias*, 14(19):11-17.
- Cruz-Cárdenas, C. I., Zelaya, M. L. X., Sandoval, C. G., De los Santos, V. S., Rojas, A. E., Chávez, D. I. F. & Ruíz, R. S. (2021). Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: consideraciones y retos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5):899-913. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v12n5/2007-0934-remexca-12-05-899.pdf>
- Cuacua-Temiz, C., Trejo-Téllez, L. I., Velasco-Velasco, J. & Gómez-Merino, F. C. (2017). Efecto de los elementos benéficos Al, Co, Se y Si en la nutrición de Heliconas (*Heliconia* sp.). *Agroproductividad*, 10(3):62-68. 10.22004/ag.econ.352646
- Das, D., Basar, N. U., Ullah, H., Salin, K. R., & Datta, A. (2021). Interactive effect of silicon and mycorrhizal inoculation on growth, yield and water productivity of rice under water-deficit stress. *Journal of Plant Nutrition*, 44(18), 2756-2769.
- Declerck, S., Plenchette, C. & Strullu, D.G. (1995). Mycorrhizal dependency of banana (*Musa acuminata*, AAA group) cultivar. *Plant Soil*, 176, 183–187.
- Deb, L. & Dutta, P. (2022). Biogenic Role of Silicon in Abiotic and Biotic Stress Management in Plants. *J. Mycol Pl Pathol*, 52(2):103-122.
- Delgado, S. H. D. & Gutiérrez, M. L. V. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *El Higo Revista de Ciencia y Tecnología*, 12(2):2-14. DOI: 10.5377/elhigo.v12i2.15196
- Delgado-Morato, L. D. & Bermúdez-Cardona, M. B. (2021). Inducción de resistencia en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y antagonismo de *Trichoderma viride* contra *Fusarium oxysporum*. *Acta Agronómica*, 70(1):101-106. DOI:10.14482/INDES.30.1.303.661

- Devi, S. H., Bhupenchandra, I., Sinyorita, S., Chongthan, S.K. & Lamalakshmi, D. E. (2021). Chapter: Mycorrhizal fungi and sustainable agriculture. En Ohyama, T. & Inubushi, K. (Eds.). *Nitrogen in agricultura: Physiological, agricultural and ecological aspects*. IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.99262
- FAO. (2023). FAOSTAT: Licencia: CC BY-NY-SA 3.0 IGO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>
- French-Monar, R. D., Avila, R. F., Korndorfer, G. H. & Datnoff, L. E. (2010). Silicon Suppresses *Phytophthora* blight development on Bell pepper. *J. Phytophathol.* 158:554-560 10.1111/j.1439-0434.2009. 01665.x
- Frew, A., Powell, J.R., Allsopp, P.G., Sallam, N. & Johnson, S.N. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi promote silicon accumulation in plant roots, reducing the impacts of root herbivory. Springer International Publishing. *Plant Soil*. DOI: 10.1007/s11104-017-3357-z
- Garg, N. y Bhandari, P. (2015). Silicon nutrition and mycorrhizal inoculations improve growth, nutrient status, K⁺/Na⁺ ratio and yield of *Cicer arietinum* L: genotypes under salinity stress. Springer Science. *Plant Growth Regul.* DOI: 10.1007/s10725-015-0099-x
- Garg, N. & Kashyap, L. (2017). Silicon and *Rhizophagus irregularis*: potential candidates for ameliorating impacts of arsenate and arsenite stress on growth, nutrient acquisition and productivity in *Cajanus cajan* (L.) Millsp. genotypes. Springer-Verlag: *Environ Sci Pollut Res*. DOI: 10.1007/s11356-017-9463-x
- Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Cuacua-Temiz, C., Jácome, C. M. de los A. & Senties-Herrera, H. (2015). Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *AGROENTORNO*, 166: 19-21.
- Guerra-Sierra, B. (2008). Micorriza arbuscular. Recursos microbiológicos en la agricultura sostenible. *Revista Tecnología En Marcha*, 21(1): 191 - 201.

- Gutiérrez, O. J. M. (2016). Compatibilidad funcional de micorrizas en el cultivo de chile para el control biológico de *Phytophthora capsici*. Tesis de Maestría en Producción Agropecuaria. UMSNH.
- Hernádi, I. & Posta, K. (2013). Real-case application of mycorrhizal inoculums on *Capsicum annuum* L. var. *longum* cv. Szegedi and Kalocsai. *International Journal of Horticultural Science*, 19(1-2):75-79
- Hernández-Pérez, T., Gómez-García, M. del R., Valverde, M. E. & Paredes-López, O. (2020). *Capsicum annuum* (hot pepper): an ancient Latin-American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potencial. A review. *Compr. Rev. Food Sci Food Saf.* Pp.1-22.
- Huber, D. M. (1997). Manejo de la nutrición para el combate de patógenos de plantas. *Agronomía Costarricense*, 21(1):99-102. https://www.mag.go.cr/rev_agr/v21n01_099.pdf
- Ibarra, M. V. A. (2015). Interacción de *Trichoderma* y *Glomus intraradices* en plántulas de maíz inoculadas con hongos fitopatógenos. Tesis de grado, Colegio de Postgraduados. <http://hdl.handle.net/10521/2615>
- INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2008). Principales enfermedades del chile (*Capsicum annuum* L.). México, D.F.
- INTAGRI. (2020). Cultivo de Chile en México. Serie Hortalizas, Núm. 21. Artículos técnicos de INTAGRI. México. 6 pp. https://www.intagri.com/public_files/21.%20Cultivo%20de%20Chile%20en%20Mexico.pdf 06/marzo/2025
- Kathpalia, R. & Bhatla, S. C. (2018). Plant Mineral Nutrition. En S. C. Bhatla & M. A. Lal (Eds.), *Plant Physiology, Development and Metabolism*, (pp. 37-81). Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-13-2023-1_2
- Kaya, C., Tuna, L. & Higgs, D. (2006). Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29(8),1469-1480. DOI: 10.1080/01904160600837238

- Khalil, G. A., Cetina, A. V. M., Ferrera, C. R., Velásquez, M. J., Pérez, M. C. A. & Larqué, S. M. (2001). Hongos micorrízicos arbusculares como componente de control biológico de la pudrición causada por *Fusarium* sp. en gladiola. *Terra Latinoamericana*, 19(3):259-264. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57319307>
- Khlar, S. B., Omer, A., Teweldemedhin, B. (2018). Medicinal uses and health benefits of chili pepper (*Capsicum* spp.): a review. *MOJ Food Processing & Technology*, 6(4): 325-328. DOI: 10.15406/mojft.2018.06.00183
- Leos-Escobedo, L., García-Carrillo, M., Delgadillo-Martínez, J. Valenzuela, G., A. A., Angulo-Castro, A., Preciado-Rangel, P. y Rueda, P. E. P. (2022). Consorcios de hongos micorrízicos y rizobacterias en el control biológico de *Phytophthora capsici* en cultivares de *Capsicum annuum*. *Biotecnia*, 24(1):30-37. DOI: 10.18633/biotecnia.v24i1.1490
- Linderman, R.G. & Davis, A.E. (2004). Varied response of marigold (*Tagetes* spp.) genotypes to inoculation with different arbuscular mycorrhizal fungi. *Sci. Hort.* 99, 67–78.
- Lohman, M., Ziegler-Ulsh, C. & Douds, D. (2010). Como inocular hongos micorrízicos arbusculares en la granja, Parte 1. <https://rodaleinstitute.org/es/ciencia/art%C3%ADculos-y-publicaciones/c%C3%B3mo-inocular-hongos-micorr%C3%ADzicos-arbusculares-en-la-granja-parte-1/>
- Ma, J. F., Miyake, Y. & Takahashi, E. (2001). Silicon as a beneficial element for crop plants. Elsevier Science.
- Majid, M. U., Awan, M. F., Fatima, K., Tahir, M., Ali, Q., Rashid, B., Rao, A. Q., Nasir, I. A., & Husnain, T. (2016). *Phytophthora capsici* on chilli pepper (*Capsicum annuum* L.) and its management through genetic and biocontrol: a review. *Zemdirbyste - agriculture*, 103 (4), 419-430. DOI: 10.13080/z-a.2016.103.054
- Michalk, D. L., Kemp D. R., Badgery W. B., Wu J., Zhang Y. & Thomassin P. J. (2019). Sustainability and future food security—a global perspective for livestock production. *Land Degradation & Development*, 30(5): 561-573.

- Moreira-Morrillo, A. A., Monteros-Altamirano, A., Reis, A. & Garcés-Fiallos, F. R. (2023). Chapter: *Phytophthora capsici* on *Capsicum* plants: a destructive pathogen in chili and pepper crops. En Bayle, B. Y. O. (Ed.). *Capsicum Current Trends and Perspectives*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.98137
- Onofre, S. J. F. (2019). El silicio (Si) como mineral multifuncional en la agricultura. Componente práctico de examen de grado para Ingeniero Agrónomo. Universidad Técnica de Babahoyo, Los Ríos, Ecuador.
- ONU. (2022). Resumen para encargados de la formulación de políticas. Efectos de plaguicidas y fertilizantes sobre el medio ambiente y la salud y formas de reducirlos. Disponible en: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34463/JSUNEPF_Sp.pdf (consultada el 22 de junio de 2023).
- Oye, A. C.C., Opfergelt, S. & Declerck, S. (2016). Silicon acquisition by bananas (c.V. Grande Naine) is increased in presence of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* MUCL 41833. *Plant Soil*, 409:77 - 85. DOI: 10.1007/s11104-016-2954-6
- Palencia, P., Martínez, F. & Oliveira, J. A. (2013). Efecto de micorrizas en plantas de fresa cultivadas en sistema de cultivo sin suelo. *Agrícola Vergel: Fruticultura, horticultura, floricultura*, 32(362), 13-16. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/17543>
- Palma-Martínez, E., Aguilar-Rincón, V.H., Corona-Torres, T. & Gómez-Rodríguez, O. (2017). Resistencia a *Phytophthora capsici* Leo., en líneas de chile huacle (*Capsicum annuum* L.). *Rev. Fitotec. Mex.*, 40 (3):359 – 363.
- Parke, J. L. & Kaeppler, S.W. (2000). Effects of genetic differences among crop species and cultivars upon the arbuscular mycorrhizal symbiosis. In: Kapulnik, Y., Douds, Jr., D.D. (Eds.), *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. *Kluwer Academic Publication*, pp. 131–146.
- Peñaloza, L. M. B. (2021). Evaluación del comportamiento agronómico del cultivo de tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) con aplicación de dióxido de silicio (SiO₂). Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Técnica de Ambato. Cevallos. 72 p.

- Quispe-Quispe, E., Moreira-Morrillo, A. A. & Garcés-Fiallos, F.R. (2022). A review about biocontrollers of *Phytophthora capsici* and its impact in *Capsicum* plants: a perspective from outside to inside the plant. *Scientia Agropecuaria*, 13(3): 275-289.
- Quiñones-Aguilar, E. E., Montoya-Martínez, A. C., Rincón-Enríquez, G. & López-Pérez, L. (2023). Inoculación de bulbilos de Agave tequilana con hongos micorrízicos arbusculares: efecto en el crecimiento y biocontrol contra *Fusarium oxysporum*. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(1), e3043. DOI: 10.21930/rcta.vol24_num1_art:3043
- Rasoolizadeh, A., Santhanam, P., Labbé, C., Shivaraj, S. M., Germain, H. & Bélanger, R. R. (2020). Silicon influences the localization and expression of *Phytophthora sojae* effectors in interaction with soybean, *Journal of Experimental Botany*, 71(21):6844-6855. DOI: 10.1093/jxb/eraa101
- Reyes, J. I. (2011). La micorriza arbuscular (MA) centro de la rizosfera: comunidad microbiológica dinámica del suelo. *Revista ContactoS*, 81, 17-23.
- Reyes-Tena, A., L. López-Pérez, E. E. Quiñones-Aguilar & G. Rincón-Enríquez. (2015). Evaluación de consorcios micorrízicos arbusculares en el crecimiento vegetal de plantas de maíz, chile y frijol. *Revista Biológicas*, 17(2): 35 – 42.
- Reyes-Tena, A., Rodríguez-Alvarado, G., Fernández-Pavía, S., Pedraza-Santos, M.E., Larsen, J. & Vázquez-Marrufo, G. (2020). Caracterización morfológica de aislados de *Phytophthora capsici* provenientes de Jalisco y Michoacán, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39(1),105-120.
- Rodrigues, F. A., Dallagnol, L. J., Silveira, D. H. S. & Datnoff, L. E. (2015). Chapter 4. Silicon Control of Foliar Diseases in Monocots and Dicots. En F. A. Rodrigues & L. E. Datnoff (Eds). *Silicon and Plant Diseases*. Springer International Publishing Switzerland. DOI: 10.1007/978-3-319-22930-0
- Rodríguez, C. E. (2018). La diversidad genética de *Capsicum annuum* de México. En: IRD Éditions. Los chiles que le dan sabor al mundo [en línea]. DOI: 10.4000/books.irdeditions.30922.

- Roca, Z. K. A. (2020). Efecto de tierra de diatomeas en el control de gorgojo del maíz (*Sitophilus zeamais*) en las zonas de Buena Fe, Quevedo y Mocache. Proyecto de Investigación. Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- SADER, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015). Producción del chile mexicano. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/produccion-del-chile-mexicano>
- Sensoy, S., Demir, S., Turkmen, O., Erdinc, C., & Savur, O. B. (2007). Responses of some different pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes to inoculation with two different arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientia horticulturae*, 113(1), 92-95.
- SEPHU, (Sociedad Española de Productos Húmicos, S.A.). (2009). El silicio (Si) como elemento fertilizante y protector de enfermedades y plagas. 28:1-8 https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/81972/028---15.05.09---El-Silicio-como-fertilizante-y-fungicida.pdf
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (s.f.). Potencial de producción de chiles y pimientos en México: Parte 1. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257072/Potencial-Chiles_y_Pimientos-parte_uno.pdf
- SNICS. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. (2017). Chile (*Capsicum* spp.). Disponible en: <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/chile-capsicum-spp> 06/03/2025
- Strömberg, C. A. E., Di Stilio, V. S. & Song, Z. (2016). The functional role of silicon in plant biology. Functions of phytoliths in vascular plants: an evolutionary perspective. *Functional Ecology*. 30: (8), 1286-1297. DOI:10.1111/1365-2435.12692
- Sonogo, S., Lamour, K., Kousik, C. S., Lozada, D. N., Parada-Rojas, C. H., Quesada-Ocampo, L. M., Wyenandt, C. A., Babadoost, M., Hausbeck, M. K., Hansen, Z., Ali, E., McGrath, M. G., Hu, J., Crosby, K. & Miller, S. A. (2023). *Phytophthora capsici*, 100 years later: research mile markers from 1922 to 2022. *Phytopathology*, 113(6):921-930. DOI: 10.1094/PHYTO-08-22-0297-RVW

- Tropicos.org. Missouri Botanical Garden. (2025). 06/marzo/2025.
<https://www.tropicos.org/name/29600002>
- Varas, C. I. A. (2021). Efecto de la aplicación edáfica del silicio en el control de *Phytophthora capsici*, en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*). Proyecto de Investigación para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo. Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- Vega, I., Pontigo, S., Nunes-Nesi, A., Mora, Ma. De la L., Meier, S. & Cartes, P. (2023). Interaction between silicon and arbuscular mycorrhizal symbiosis: an ecologically sustainable tool to improve crop fitness under drought scenario? review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 23:125-138. DOI: 10.1007/s42729-021-00701-y
- Victoria, D. P. C. (2022). Efecto del silicio sobre el desarrollo y rendimiento en el cultivo pimiento (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones controladas. Proyecto de Investigación para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo. Quevedo, Los Ríos, Ecuador.
- Villalón-Mendoza, H., Castillo-Villareal, M.A., Garza-Ocañas, F., Guevara-González, J.A. & Sánchez-Castillo, L. (2018). Dióxido de silicio como estimulante del índice de calidad de plantas de chile piquín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) producidas en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50): DOI: 10.29298/rmcf.v9i50.247
- Velásquez-Valle, R., Reveles-Torres, L. R. & Reveles-Hernández, M. (2013). Manejo de las principales enfermedades del chile para secado en el norte centro de México. Follero Técnico. Núm 50. Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC-INIFAP, 57 PP.
- Verma, K. K., Song, X. P., Tian, D. D., Guo, D. J., Chen, Z. L., Zhong, C. S., Nikpay, A., Singh, M., Rajput, V. D. & Singh, R. K. (2021). Influence of silicon on biocontrol strategies to manage biotic stress for crop protection, performance, and Improvement. *Plants*, 10, 2163. DOI: 10.3390/plants10102163
- Willey, N. (2016). Chapter: 6. Phosphorus. En: Willey, N. (2016). *Environmental Plant Physiology*. Garland Science, Taylor & Francis Group, LLC.

- Zhang, X., Ma, X., Wang, S., Liu, S. & Shi, S. (2024). Physiological and Genetic Aspects of Resistance to Abiotic Stresses in *Capsicum* Species. *Plants*, *13*, 3013. 3. DOI: 10.3390/plants13213013.
- Zuma, M., Arthur, G., Cooposamy, R. & Naidoo, K. (2023). Incorporating cropping systems with eco-friendly strategies and solutions to mitigate the effects of climate change on crop production. *Journal of Agriculture and Food Research*, *14*:1-8 DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100722

XIII. Anexos



CIENCIA *ergo-sum*
Universidad Autónoma del Estado de México
ciencia.ergosum@yahoo.com.mx
E-ISSN: 2395-8782

Capítulo I. El silicio (Si), un aliado de las plantas

Referencia del artículo formato APA (**No completar**)

Sección: (**No completar**)

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

El Silicio (Si), un aliado de las plantas

Silicon (Si), an ally of plants

Yamilet Mora Soto

Adscripción: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Correo electrónico: 1132958f@umich.mx

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-9806-6826>

Alfredo Reyes Tena

Adscripción: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Correo electrónico: alfredo.reyes@umich.mx

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9112-8303>

Luis López Pérez

Adscripción: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ¹

Correo electrónico: luis.lopez.perez@umich.mx

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7904-9039>

Recepción: **no completar**

Aprobación: **no completar**

Resumen

Este artículo de divulgación explora el impacto del silicio (Si), en la nutrición y resistencia de las plantas. El objetivo fue destacar su papel en la mitigación del estrés biótico y abiótico, pese a no considerarse un nutriente esencial. La metodología consistió en una revisión de investigaciones previas sobre su presencia en el suelo, mecanismos de absorción y efectos fisiológicos. Los resultados sugieren que el silicio fortalece estructuras de la planta, mejora la adaptación a condiciones adversas y optimiza el crecimiento vegetal. Su uso en prácticas agrícolas indica que aumenta la productividad y sostenibilidad, evidenciando la necesidad de reconsiderar su clasificación en la nutrición vegetal. En conclusión, estos hallazgos evidencian nuevas estrategias en el manejo de cultivos y su protección.

PALABRAS CLAVE: nutrición, elementos benéficos, crecimiento vegetal, protección vegetal.

ABSTRACT

This outreach article explores the impact of silicon (Si) on plant nutrition and resilience. The objective was to highlight its role in mitigating biotic and abiotic stress, despite not being considered an essential nutrient. The methodology consisted of a review of previous research on its presence in the soil, absorption mechanisms, and physiological effects. The results suggest that silicon strengthens plant structures, improves adaptation to adverse conditions, and optimizes growth. Its use in agricultural practices indicates increased productivity and sustainability, highlighting the need to reconsider its classification in plant

nutrition. In conclusion, these findings point to new strategies in crop management and plant protection.

KEYWORDS: *nutrition, beneficial elements, plant growth, plant protection.*

INTRODUCCIÓN

Todas las plantas requieren nutrientes para crecer, formar tejidos y los órganos que a diario comemos, de alguna forma u otra, son parte fundamental para la fabricación de moléculas que ayudan a la planta a alimentarse y fortalecerse ante los cambios del ambiente. En este sentido, te has preguntado ¿cuáles son estos nutrientes?, ¿en qué cantidad son necesarios?, ¿de dónde los obtienen?, ¿existen más elementos que se podrían considerar como nutrientes?, las respuestas a estas interrogantes pudieran ser básicas para las personas que estudian las plantas, sin embargo, en ocasiones poco se sabe de ciertos elementos como el silicio (Si), que poco a poco ha ido incorporándose en la agricultura debido a las investigaciones que determinan sus funcionalidad e importancia en la producción agrícola y que años atrás ha sido considerado como un nutriente beneficiosos y no esencial, dado que está presente en forma abundante en la corteza terrestre. Como todas las especies vegetales comparten las mismas rutas metabólicas para la formación de las moléculas que les permiten crecer y aprovechar su entorno, entonces, es probable que el Si también se considere un nutriente esencial para muchas otras plantas. De ahí que resulta interesante conocer de qué forma este elemento poco estudiado podría considerarse útil en la producción de alimentos de origen vegetal, considerando su uso como promotor del crecimiento y protector contra las enfermedades que a diario se presentan en la agricultura.

1. Las plantas requieren nutrientes

Las plantas son seres vivos pertenecientes al reino vegetal, se originaron a finales del período Devónico, hace aproximadamente 380 millones de años. En la actualidad, han adquirido la capacidad de colonizar todos los hábitats presentes de la Tierra (Gutiérrez, 2020) y en producir semillas o en desarrollar sistemas conductores como el xilema y el floema para distribuir agua y nutrientes en su propio sistema, también han formado tejidos con funciones de protección y de sostén. Cabe destacar que estos organismos son autótrofos, lo cual significa que producen sus propio alimento, esto lo logran mediante el proceso metabólico nombrado fotosíntesis, el cual se lleva a cabo en organelos especializados llamados

cloroplastos, aquí el dióxido de carbono que fijan las hojas y el agua que absorben de las raíces se transforman en carbohidratos (azúcares) y oxígeno. Este proceso permitió la vida vegetal y animal como la conocemos hasta ahora, pues, requiere de la energía solar, reacciones bioquímicas, enzimáticas y energéticas como el NADPH y ATP para elaborar otros compuestos útiles y necesarios como proteínas, lípidos, aceites esenciales, hormonas, etc., con el fin de que puedan sobrevivir o inclusive sean de alimento para otros seres vivos. Para ello, necesitan de ciertos recursos necesarios que otorga el suelo y puedan absorber por medio de la raíz y transportar al cuerpo vegetativo para lograr crecer, desarrollarse, adaptarse, reproducirse, sobrevivir y coexistir en el medio al cual se encuentran ancladas, lo que les ha conferido evolucionar y colonizar con éxito los ambientes terrestres (Chuncho et al., 2019, Gutiérrez, 2020 y Campbell et al., 2021).

Para garantizar el desarrollo y funcionamiento óptimo de la fotosíntesis en las plantas, éstas dependen de tres fuentes principales como el aire, agua y suelo. Donde podemos encontrar diferentes minerales considerados como esenciales y otros considerados como beneficiosos, es decir que las plantas los adquieren por altas o mínimas concentraciones, ya que al existir excesos o deficiencias aparecen algunos síntomas como malformaciones, crecimiento anormal, decoloraciones, quemaduras, etc. Por lo que, la nutrición mineral es fundamental en la agricultura para diagnosticar a tiempo los productos agrícolas, modernizar las prácticas agrícolas, proteger el medio ambiente y comprender las interacciones ecológicas de las plantas (Kathpalia y Bhatla, 2018 y Taiz et al., 2022).

1.1. Nutrientes esenciales para las plantas

Las plantas por medio de sus raíces extraen, captan, absorben nutrientes del suelo y agua, estos están en forma de iones y compuestos inorgánicos de los cuáles se han identificado más de 60 elementos, pero no todos son incorporados a las plantas, sin embargo, solo 16 son considerados como esenciales en angiospermas y gimnospermas, lo que significa que son necesarios para que la planta los acumule e integre a su metabolismo y pueda completar su ciclo de vida. El carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O₂) componen más del 90% de las plantas y se obtienen del agua y el CO₂ que, en presencia de luz, producen carbohidratos. Luego, destacan seis elementos que son requeridos en concentraciones altas, razón por la cual son llamados como macronutrientes y estos son: el nitrógeno (N), el cual es

constituyente de formar parte de compuestos de carbono en la planta para su desarrollo, crecimiento, formación de frutos y granos; el fósforo (P), propicia al metabolismo energético, la fotosíntesis y respiración, así como la germinación de las semillas; el potasio (K), se encarga de controlar y regular la transpiración evitando la pérdida de agua dentro de las células; el azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg) intervienen en la síntesis de vitaminas, clorofila, compuestos volátiles y proteínas para preservar las estructuras celulares, brindar rigidez a la pared celular y protección contra patógenos (Bonilla, 2013; Taiz et al., 2022;).

Ahora bien, existen otros elementos que la planta necesita en cantidades pequeñas, pues en exceso pueden resultar tóxicos y a estos se les conoce como micronutrientes, donde se incluyen al cloro (Cl), hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) en el caso de la cebada y molibdeno (Mo), todos ellos tienen la función en participar como componentes en reacciones enzimáticas, metabólicas y de balance, dado que equilibran cargas positivas y negativas en el interior de las células vegetales (Bonilla, 2013; Taiz et al., 2022).

1.2. Elementos beneficiosos

Del mismo modo como se ha indicado la relevancia de los elementos esenciales también existen los que son considerados como beneficiosos, debido a que tienen la característica de aportar o participar en funciones específicas y con concentraciones muy bajas dado que pueden aplicarse de forma foliar o radicular en sistemas hidropónicos y en soluciones de florero, en el caso de especies ornamentales (Bonilla, 2013 y Gómez-Merino, et al., 2015). Entre los múltiples beneficios están el de suplir o compensar aquellos efectos tóxicos que pueden llegar a ocasionar otros elementos, además estimulan al crecimiento y desarrollo de las plantas, mejoran la nutrición y el deterioro del entorno del suelo, detonan la defensa en la planta contra el estrés biótico y abiótico (Bonilla, 2013; Gómez-Merino, et al., 2015 y Willey, 2016). Entre ellos, se encuentra al sodio (Na), para plantas con metabolismo fotosintético C₄ como el amaranto, el maíz, la caña de azúcar, y sorgo, donde se han evidenciado múltiples beneficios y ante la deficiencia de potasio (Gómez-Merino et al., 2015), por otra parte, las plantas CAM como las crasuláceas, el nopal, la pitahaya y orquídeas (INTAGRI, 2018), el Na mejora el crecimiento vegetal (Gómez-Merino et al., 2015). Por otro lado, el cobalto (Co) interviene en la fijación y asimilación de nitrógeno en leguminosas; así pues, el selenio (Se)

puede aplazar la senescencia, disminuir el impacto negativo de la radiación solar y activar mecanismos antioxidantes. No obstante, el yodo (I) aplicado en dosis correctas intercede en la absorción de nitrógeno en lechuga y espinaca, además mejora la absorción de otros elementos esenciales como Mg, Fe y Zn e incrementa el rendimiento y el tamaño de los frutos de manzano (Gómez-Merino et al., 2015), el aluminio (Al), se ha reportado en la literatura que ayuda en el desarrollo de la radícula en la semilla, en la modulación del color en las hortensias, además, mejora el crecimiento y tiempo de vida de floración como en las rosas, lisiantus y rododendro, asimismo, detona mecanismos de defensa contra algún estrés y ayuda en el establecimiento de la plántula, sin embargo, este elemento en concentraciones altas puede reducir el crecimiento de las raíces, por lo que afectaría la absorción de agua y nutrientes, impidiendo así el crecimiento vegetal (Bonilla, 2013; Gómez-Merino, et al., 2015 y Kochhar y Kaur, 2020).

Otro elemento beneficioso es el silicio (Si), este elemento en años recientes ha captado mayor atención y se han realizado varios trabajos e investigaciones en distintas plantas de interés agrícola, señalando que puede ayudar a contrarrestar efectos adversos de diversos tipos de estrés biótico y abiótico (Aguirre et al., 2020), equilibrar los efectos tóxicos de metales pesados, aumenta el crecimiento en avena, incrementa la germinación en melón y activa mecanismos de defensa y vitalidad en las plantas, pues se ha reportado que en clavel, el Si disminuye la producción de etileno propiciando el tiempo de floración en florero (Gómez-Merino et al., 2015).

2. Diferencias entre silicio y sílice

Antes de comenzar es necesario diferenciar los conceptos silicio y sílice, para ello, se recurre a la química inorgánica, pues el término silicio es un elemento que se encuentra en la tabla periódica del grupo 4A, tiene como simbología (Si) y considerado como un metaloide tetravalente y un buen semiconductor, por ello, es usado en los circuitos electrónicos. Es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre de la Tierra al representar el 27.2%. Mientras que, la sílice es un compuesto formado por la unión del silicio con el oxígeno y es representado con la fórmula molecular SiO₂ o conocido como dióxido de silicio. Este compuesto es el más estable y se encuentra en la naturaleza como cuarzo, caolinita Al₂Si₂O₅(OH)₄, esméctica, vermiculita (Mg, Fe, Al)₃(Al,Si)₄O₁₀(OH).4H₂O, sílice amorfo o

silicofitolitos SiO₂nH₂O, formas cristalinas como el feldespato, ortoclasa, plagioclasa y silicatos (SiO₄), tales como el silicato de aluminio Al₂SiO₅, silicato de magnesio Mg₂SiO₄, silicato de potasio K₂O.nSiO₂, silicato de hierro Fe₂SiO₄, el silicato de calcio Ca₂SiO₄, el silicato de sodio Na₂SiO₃, estos compuestos están presentes en las arenas, arcillas y en menores proporciones en el suelo (Liang et al., 2015a; Chang y Overby, 2019; Osterrieth et al., 2019; Bist et al., 2020 y Maldonado, 2022). A nivel industrial, la sílice es empleada para la producción de vidrio, productos químicos, en la industria de la construcción, electrónica, para filtración, alimentos y en medicina (IGME, 2022).

2.1. ¿De qué forma se almacena el silicio en los organismos?

El silicio es un elemento químico con gran importancia para algunos organismos y en particular para las plantas, ya que la manera en la que está disponible es como ácido silícico o ácido monosilícico (H₄SiO₄), este compuesto se forma por la erosión o desgaste de las rocas ígneas y sedimentarias de la litosfera, debido por la temperatura, el pH, el agua y la actividad microbiana (Raturi et al., 2021). Sin embargo, el ciclo del silicio comienza de manera natural mediante la meteorización de las rocas de silicio o de silicato en las montañas, en la costa o en los ríos, después de esto, los fragmentos de roca de silicato liberados al agua se mezclan y crean una reacción química utilizando el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, por ello, la meteorización es importante para liberar Si disuelto en el agua y eliminar el CO₂ atmosférico (Cassarino et al., 2024). Así mismo el silicio disuelto es dirigido hacia los mares y océanos, donde a su vez, algunos organismos como las esponjas de mar, los radiolarios y las diatomeas capturan grandes cantidades de silicio y lo absorben y depositan en su esqueleto o pared celular, para formar espículas, conchas opalinas y frústulas, ya que estas estructuras les servirán de protección contra depredadores o ante factores ambientales y puedan realizar su función como es la de capturar dióxido de carbono (CO₂) tanto de la atmósfera como del lecho marino. Posteriormente, cuando mueren estos seres vivos se libera el silicio de su esqueleto y se mezcla con el agua para después ser utilizado nuevamente o se irá a sedimentar en el fondo marino, allí tal vez le lleve mucho tiempo permanecer enterrado junto con el carbono capturado (Raya y Aguirre, 2012; Britannica, 2023 y Cassarino et al., 2024). Por otra parte, a medida que los suelos se deterioran y empobrecen el suministro de silicio, se vuelve menos disponible en particular para las plantas, asimismo existen evidencias e

investigaciones que revelan que el ciclo del silicio podría estar regulado por el tiempo, la meteorización, la naturaleza y tamaño de las partículas, el pH del suelo, el clima húmedo, la erosión acidificada, la textura, la mineralogía y la acción de microorganismos como las bacterias solubilizadoras de silicatos (SSB) (Tombeur et al., 2020 y Raturi et al., 2021). Se han reportado los siguientes géneros de SSB como: *Acidobacillus*, *Burkholderia*, *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Aminobacter*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, etc., a su vez, están presentes y distribuidas en ambientes como el suelo, agua, sedimentos, minerales, rocas erosionadas y en la rizosfera, tienen una importante participación en el ciclo biogeoquímico del Si y un gran potencial para solubilizar silicatos e incrementar la disponibilidad de este elemento en las plantas promoviendo la fertilidad de los suelos en la agricultura (Raturi et al., 2021).

Como se planteó en el párrafo anterior, el Si es asimilado por las plantas como ácido silícico, sin embargo se han postulado sus posibles mecanismos de absorción y guardan relación con la absorción del agua, pues de esta forma puede el Si atravesar la membrana plasmática de las células presentes en la raíz de la planta, cabe destacar que depende de la capacidad de las raíces de absorberlo, la presencia y expresión de genes, la identificación de los transportadores en las diferentes especies vegetales (Mitani-Ueno y Feng, 2020), por ello, es necesario conocer el ciclo biogeoquímico del Si, su importancia en el funcionamiento con los ecosistemas, la relación con la fertilidad y los cambios de uso de suelo y la variación filogenética de las plantas (Hodson et al., 2005 y Schaller et al., 2021). Acorde a los tipos de absorción del silicio pueden efectuarse por transporte pasivo o difusión facilitada, es aquí donde por canales proteicos de la membrana plasmática de la célula, garantizan la absorción del Si en la planta y depende del gradiente de concentración, este mecanismo está presente en la mayor parte de las especies vegetales, por otro lado, en el transporte activo no está relacionado al gradiente de concentración pero se ha identificado en plantas con alta e intermedia capacidad de acumulación de Si (Raven, 2003 y Gaur et al., 2020). Se ha descubierto en las raíces de arroz, cebada, maíz y trigo transportadores de Si como es *Lsi1* (*OsLsi1*), el cual es el primer gen de entrada identificado y responsable de facilitar el transporte pasivo a través de las acuaporinas, proteínas inducidas por el gen y presentes en la membrana plasmática de las células, estas cavidades están en la exodermis y endodermis, ambos tejidos son un conjunto de células que bordean a la raíz para absorber el Si y puede retomar dirección por dos vías, una es por el apoplasto o es el espacio extracelular de las

células y simplasto o espacio intracelular de las células de la planta. Existen más genes como Lsi1, Lsi2, Lsi3 y Lsi6, que son los encargados en activar las proteínas presentes en la membrana plasmática de las células en la planta y puedan permitir el transporte del Si a la exodermis, endodermis, células corticales y parenquimáticas (Ma y Yamaji, 2015; Guo-chao et al., 2018). Además, aún falta seguir investigando otros transportadores de Si en otras partes de la planta (Gaur et al., 2020).

Por otra parte, después de que el Si es absorbido por las células de la raíz y el agua contenida al interior de la planta es evaporada, el ácido silícico se sobresatura en el interior de la planta y se precipita en forma de fitolitos (Reven, 2003) conforme va siendo transportado hacia la pared celular el Si se acumula en las hojas y brotes formando un tejido silicificado. Sin embargo, no en todas las plantas llega a presentarse este proceso de biomineralización, pues depende de la transpiración, la distribución de los fitolitos y en la capacidad de las plantas que logren acumular el silicio en sus células (Strömberg et al., 2016). Así pues, la cantidad de silicio depositado en la materia seca depende de la unidad de agua transpirada, a su vez este Si regresa y se une al ciclo del silicio (Reven, 2003).

3. Aplicaciones del silicio en la agricultura

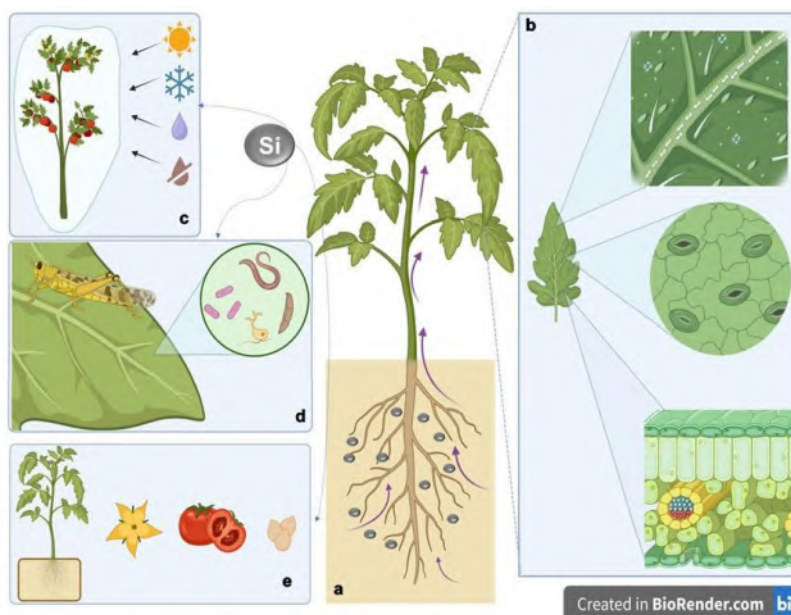
Se ha reportado sobre el uso del silicio en la agricultura hace más de 2000 años, en China, ya que los agricultores incorporaban paja de arroz con estiércol como fertilizante para mejorar el rendimiento de los cultivos, pero en 1917, Isenosuke Onodera fue probablemente el primer científico quien descubrió que el silicio tiene un papel importante al reducir enfermedades en plantas de arroz. Al ser descubierto el silicio, existió un mayor interés por su uso en otros cultivos, donde ha mostrado tener la capacidad para contrarrestar diferentes tipos de estrés tanto bióticos y abióticos (Liang et al., 2015b, Hassan y Ryong, 2018). En algunos países como Japón, Corea, Brasil, Australia, Sudáfrica e India utilizan el silicio como fertilizante y lo incluyen en diferentes formulaciones comerciales (Liang et al., 2015b). Cabe destacar, que a nivel mundial el volumen de producción del silicio en el año 2022 fue de 8.8 millones de toneladas métricas y China es el mayor productor de este mineral, le siguen Rusia, Brasil, Noruega y Estados Unidos, aunque es difícil encontrarlo como elemento puro, pero tiene diversos usos en la industria (Statista Research Department, 2024).

No obstante, se han utilizado diferentes tipos de fuentes a base de silicio como las orgánicas

en las que destacan las cenizas de cascarilla de arroz, el biochar, estiércol y compost, así como también las inorgánicas como el gel de sílice, ácido silícico, escorias ricas en silicio, silicato de sodio, silicato de calcio, silicato de potasio, sílice amorfa (SiO₂), nanopartículas de SiO₂ (Ahammed y Yang, 2021) y tierra de diatomeas la cual tiene un 90% de SiO₂ (Loya et al., 2022).

Por lo tanto, en términos generales (Fig. 1), el Si en la agricultura tiene amplios beneficios como es la deposición de este elemento en la planta brindando rigidez y fuerza, además está involucrado en el crecimiento, desarrollo de las plantas, estimulación de la actividad enzimática y mecanismos de defensa y generación de antioxidantes útiles para la planta en condiciones de estrés hídrico (Ahmad, 2021); además se ha reportado que el Si interviene en la reparación celular, regula el metabolismo y en la síntesis de fitohormonas, sin embargo, estas últimas requieren de una investigación más detallada junto con el conocimiento de los procesos moleculares (Pandey et al., 2024).

Figura 1
Representación de los beneficios del silicio en las plantas de interés agrícola



Fuente: elaboración propia.

Nota: a. Absorción del silicio por medio del suelo y transportado hacia los brotes y hojas; b. formación de tricomas, regulación estomática y rigidez en la pared celular; c y d. protección ante los factores de estrés abióticos y bióticos; e. mejor rendimiento y productividad en los cultivos.

En relación con lo anterior, este elemento mejora en las plantas la resistencia y tolerancia a

la salinidad de los suelos, modula e interviene en diferentes procesos fisiológicos y bioquímicos (Dhiman et al., 2021), disminuye la absorción y acumulación por la toxicidad de metales pesados, permitiendo tener alimentos más seguros y confiables para ser consumidos, sin embargo, los mecanismos siguen siendo aún desconocidos en como el Si interviene para la desintoxicación de metales pesados en las plantas por lo que se requieren investigaciones más profundas, tanto a nivel celular y molecular (Khan et al., 2021). Otro atributo el cual el Si ha despertado el interés es en la capacidad de atenuar los daños por desequilibrio de nutrientes, pues su relación está concentrada en la actividad del silicio con bacterias solubilizadoras y movilizadoras que incrementan la fertilidad del suelo y promueven el crecimiento vegetal (Raza et al., 2023), otro aspecto relevante del Si en la agricultura es el de mitigar los daños ocasionados por las sequías, la radiación UV y los cambios bruscos de temperatura, los cuales afectan a las plantas con el crecimiento vegetal y la producción de frutos, sin embargo, al adicionar silicio bajo esas condiciones existe incremento en el contenido de clorofila, azúcares, antocianinas, flavonoides y componentes antioxidantes en las plantas (Čermelj et al., 2021).

Por otra parte, la aplicación del silicio ante la presencia de plagas y enfermedades se ha reportado que el silicio mejora la rigidez celular de los tejidos de la planta y evita la entrada de patógenos; lo cual, activa en la planta su sistema de defensa sistémica contra microorganismos nocivos (Liang et al., 2015c; Rodrigues et al., 2015). Así, por ejemplo, el uso de tierra de diatomeas suele tener un efecto protector en granos de maíz, así como de insecticida contra *Sitophilus zeamais*, sin embargo, dada su potencialidad sugieren más pruebas y ser una alternativa sostenible para el manejo de plagas en silos de almacenamiento de granos (Marrero-Artabe et al., 2020). Otro rasgo de la aplicación de tierra de diatomeas *in vitro* sobre el molusco *Arion distinctus* es que tiene efecto en su movilidad y mortalidad, lo que este producto es eficaz para el control de babosas en cultivos de fresa (Méndez-Otero et al., 2019). En caso de aplicar otros productos a base de silicio, se ha demostrado que reduce la incidencia de plagas como la mosca blanca en plantas de tomate, esto es debido a que los cristales de Si se acumulan en los haces conductores de los insectos (Peñaloza, 2021).

Cabe considerar, que en los suelos fragmentados existen deficiencias de Si, por lo que podría ser un factor limitante para la producción de los cultivos, debido a que es removido o

absorbido del suelo y ya no es regresado, así pues, la importancia de conocer el uso apropiado y cuantificado de fertilizantes con Si deben realizarse pruebas adicionales para su detección (Haynes, 2017).

3.1. Evidencias del silicio en el control de enfermedades en plantas

En la década de los 1950's, se comenzó a indagar sobre los efectos del Si en los cultivos de arroz, ya que mejoraban el rendimiento y crecimiento, pero al mismo tiempo disminuía la incidencia de enfermedades que lo atacan. Por ello, el comienzo de las investigaciones desde la década de 1980's hasta nuestra actualidad, se conoce que el Si reduce la intensidad de enfermedades que son causadas por hongos, oomycetes, bacterias, virus y nematodos en muchas especies vegetales importantes (Datnoff y Rodrigues, 2015). Algunos ejemplos de evidencias que se destacan a continuación sobre el uso del Si en el control de enfermedades se encuentran el de Delgado-Morato y Bermúdez-Cardona, (2021), los cuales, reportan que al agregar el silicio como agente inductor incrementa la actividad enzimática de Polifenoloxidasas (PPO) y proponen como alternativa para el manejo de marchitez vascular generado por *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* en plantas de tomate. Así pues, los estudios realizados al agregar silicio en los cultivos de arroz minimizan el daño causado por los hongos *Magnaporthe oryzae* y *Rhizoctonia solani*, debido a que el Si se deposita en la pared celular y espacios intercelulares de la planta o induce la biosíntesis de lignina maximizando los beneficios y controlando las enfermedades de estos agentes causales (Sathe et al., 2021). De la misma forma, al aplicar el Si de manera exógena mejora la tolerancia en la caña de azúcar ante la infección por la bacteria *Xanthomonas albilineans* pues modula y activa la expresión tanto hormonal y actividad enzimática en la Fenilalanina amonio-liasa (PAL), el ácido jasmónico (JA) y ácido salicílico (SA) (Hong et al., 2021).

Por ello, como se ha descrito anteriormente los efectos notables del silicio en la reducción de las múltiples enfermedades causadas por los organismos patógenos en las plantas, permite ser una estrategia integrada al manejo de enfermedades y reduce el uso de agentes químicos, lo cual no daña al medio ambiente (Rodrigues et al., 2015).

PROSPECTIVA

Las plantas son seres vivos que dependen directamente de las condiciones del ambiente para

crecer y sobrevivir, pero a medida que entendemos su funcionamiento, vamos descubriendo que existen otros elementos químicos en la naturaleza que podrían desempeñar funciones clave en el metabolismo vegetal. Tal como ha documentado Pandey et al., (2024) sobre el silicio, que es poco conocido y requiere de investigaciones moleculares más a fondo, así como también, el impacto del Si en la absorción, transporte y desintoxicación por metales pesados y el efecto que tiene este elemento ante diversas especies vegetales. Sin embargo, como se mencionó anteriormente muchos de sus beneficios están relacionados con mejorar la resistencia a factores de estrés como la sequía y la presión por enfermedades principalmente en la raíz o el tallo.

En este sentido, la realización de estudios sobre el uso del silicio en la agricultura principalmente para mejorar la nutrición y salud de los cultivos ha favorecido el desarrollo de nuevos productos elaborados con silicio como uno de los principales ingredientes activos.

Por esta razón, el silicio podría tener un uso continuo en la agricultura y al ser un elemento natural, que no impacta su uso al ambiente, ni a los agricultores lo cual ayudaría en aminorar los graves problemas ambientales actuales en los agroecosistemas, por el uso excesivo de agroquímicos.

Por otro lado, es relevante considerar la dosis de silicio a utilizar, así como la fuente y el modo de aplicación, como se ha reportado en las diversas investigaciones este elemento favorece la absorción de agua y otros nutrientes minerales, lo que podría favorecer a la sanidad de la planta.

De acuerdo con lo anterior, resulta claro que este elemento puede emplearse como un componente en diversos fertilizantes e inductores de resistencia a plagas y enfermedades, no obstante, quedan algunas preguntas sin abordar, ¿cómo actúa el silicio con la microbiota nativa del suelo? ¿qué implicaciones tendría con su aplicación constante en campo? y ¿qué cantidades son necesarias para incorporarlo a los cultivos agrícolas?

Por otra parte, cabe indicarse que el consumir vegetales ricos en silicio mejoraría nuestra alimentación, al ser considerado un oligoelemento fundamental para la formación y mantenimiento de los huesos, estructuras nerviosas y piel.

Finalmente, hay muchos atributos beneficiosos de uso del silicio en la agricultura como se ha mencionado, pero aún existen vacíos de información sobre sus funciones y mecanismos de acción lo cual hace imperante la necesidad de seguir investigando sobre este elemento viendo sus potenciales beneficios en diferentes condiciones.

CONCLUSIONES

De acuerdo con lo presentado en este trabajo, el silicio es un elemento muy abundante en la corteza terrestre de la Tierra, el cual puede desempeñar funciones importantes en el funcionamiento fisiológico de las plantas como el crecimiento, el desarrollo y mitigación a ciertos tipos de estrés. Sin embargo, este elemento resulta poco comprendido, ya que no es considerado como un nutriente esencial y no es lo suficientemente claro los mecanismos que intervienen al ser transportado en el interior celular y traslocación en la planta. En la medida que nuevas investigaciones reporten los mecanismos relacionados con su absorción, transporte y funciones del silicio en las plantas, es posible que aparezcan en el mercado nuevos productos con formulaciones a base de este elemento. En conclusión, el silicio junto con otros elementos beneficiosos, podrían formar parte de las estrategias de nutrición, manejo integrado de plagas y enfermedades y mitigación de estreses medioambientales todos estos con un enfoque sustentable en la agricultura actual.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a los árbitros, que revisaron la estructura y contenido de este artículo de divulgación. Sus observaciones y sugerencias fueron fundamentales para mejorar la claridad y rigor del trabajo presentado. La primera autora agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el apoyo financiero otorgado a través de la beca para estudios de maestría. El segundo y tercer autor agradecen a la CIC de la UMSNH, por el financiamiento de los proyectos de investigación 2025 y al ICTI, Michoacan, por el financiamiento de los proyectos FCCHTI23_ME-4.1.-0028 UMSNH/DVSS/87/202 y FCCHTI23_ME-4.1.-0011 UMSNH/DVSS/77/2023. Su respaldo ha sido esencial para la generación de conocimiento y de fortalecimiento a la investigación científica

REFERENCIAS

- Aguirre, A. J., Gómez-García, D., Azorín, J. & Fillat, F. (2020). Contenido en sílice y su variación en algunas plantas abundantes en los pastos de los pirineos. 53ª Reunión Científica de la SEEP. Pastos y Pac. 73-80 pp.
https://digital.csic.es/bitstream/10261/110280/1/Aguirre%2C%20A.%20J.Contenido%20en%20s%C3%ADlice%20y%20su%20variaci%C3%B3n_SEEP2014.pdf
- Ahammed, G. J. & Yang, Y. (2021). Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165:200-206.
DOI:10.1016/j.plaphy.2021.05.031
- Ahmad, M. M., Hussain, W. A., Hamid, M. S., Ul, R. I., Tahir, I., Ahmad, P. & Rashid, I. (2021). Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165:187-195. DOI:10.1016/j.plaphy.2021.04.021
- Bist, V., Niranja, A., Ranjan, M., Lehri, A., Seem, K. & Srivastava, S. (2020). Silicon-solubilizing media and its implication for characterization of bacteria to mitigate biotic stress. *FronT. Plant Sci*, 11:28. DOI:10.3389/fpls.2020.00028
- Bonilla, I. (Ed.). (2013). Capítulo 6. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. En J. Azcón-Bieto & M. Talón (Coords.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. (pp. 103-119). McGraw Hill Interamericana.
- Britannica, T. Editores de la Enciclopedia. (2023). Silicio. Enciclopedia Británica.
<https://www.britannica.com/science/silicon>
- Campbell, N. A., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V. & Orr, R. B. (Eds.). (2021). *Biology. A Global Approach* (12th ed.). Pearson Education Limited.
- Cassarino, L., Pickering, R. A., Zhang, Z. & Liguori, B. (2024). The silicon cycle in the ocean. *Front. Young Minds*. 12:1178327. DOI:10.3389/frym.2023.1178327
- Čermelj, A. M., Golob, A., Vogel-Mikuš & Germ, M. (2023). Silicon Mitigates Negative

impacts of drought and UV-B radiation in plants. Review. *Plants*, 11-91.

DOI:10.3390/plants11010091

Chang, R. & Overby, J, K. A. (2019). *Chemistry* (13th ed.). McGraw-Hill Education.

Chuncho, V. G. A., Chuncho, M. C. G. & Aguirre M. Z. H. (2019). *Anatomía y morfología vegetal*. Universidad Nacional de Loja, Ecuador.

Datnoff, L. E. & Rodrigues, F. A. (2015). Chapter 1. History of Silicon and Plant Disease. En F. A. Rodrigues & L. E. Datnoff. *Silicon and Plant Diseases*. Springer International Publishing Switzerland. DOI:10.1007/978-3-319-22930-0

Delgado-Morato, L. D. & Bermúdez-Cardona, M. B. (2021). Inducción de Resistencia en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y antagonismo de *Trichoderma viride* contra *Fusarium oxysporum*. *Acta Agronómica*, 70(1):101-106. DOI:10.14482/INDES.30.1.303.661

Dhiman, P., Rojora, N., Bhardwaj, S., Sudhakaran, S. S., Kumar, A., Raturi, G., Chakraborty, K., Prakash, G. O., Devanna, B. N., Kumar, T. D. & Deshmukh, R. (2021). Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162:110-123. DOI:10.1016/j.plaphy.2021.02.023

Gaur, S., Kumar, J., Kumar, D., Kumar, C. D., Mohan, P. S. & Kumar, S. P. (2020). Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202:110885. DOI:10.1016/j.ecoenv.2020.110885

Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Cuacua-Temiz, C., Jácome, C. M. de los A. & Senties-Herrera, H. (2015). Los elementos benéficos: potencial para innovar la producción agrícola. *AGROENTORNO*, 166: 19-21.

Guo-chao, Y., Nikolic, M., Mu-jun, Y., Zhuo-xi, X. & Yong-chao, L. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10):2138-2150. DOI:10.1016/S2095-3119(18)62037-4

Gutiérrez, H. F. & Pensiero, J. F. (2020). Capítulo 3 Espermatófitos. En H. F. Gutiérrez

(Ed.), *Botánica sistemática de las plantas con semillas* (pp. 58-59). Santa Fe: Ediciones UNL.

https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/5567/botanica1_web.pdf

Hassan, E. & Ryong, J. B. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147:881-896. DOI:10.1016/j.ecoenv.2017.09.063

Haynes, R. J. (2017). The nature of biogenic Si and its potential role in Si supply in agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 245:100-111. DOI:10.1016/j.agee.2017.04.021

Hodson, M. J., White, P. J., Mead, A. & Broadley, M. R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*, 96: (6):1025-1046. DOI: 10.1093/aob/mci255

Hong, D.-d., Talha, J., Yao, Y., Zou, Z.-y., Fu, H.-y., Gao, S.-j., Xie, Y. & Wang, J.-d. (2021). Silicon enhancement for endorsement of *Xanthomonas albilineans* infection in sugarcane. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 220:112380. DOI:10.1016/j.ecoenv.2021.112380

IGME (Instituto Geológico y Minero de España). (2022). Panorama Minero. Sílice (Industrial) 2021. Disponible en: <https://info.igme.es/media/Pdfs/SILICE%202021.pdf>

INTAGRI. (2018). Plantas C3, C4 Y CAM. https://www.intagri.com/public_files/125.-Plantas-C3-C4-y-CAM.pdf

Kathpalia, R. & Bhatla, S. C. (2018). Plant Mineral Nutrition. En S. C. Bhatla & M. A. Lal (Eds.), *Plant Physiology, Development and Metabolism*, (pp. 37-81). Springer, Singapore. DOI:10.1007/978-981-13-2023-1_2

Khan, I., Afzan, A. S., Rizwan, M., Ali, S., Jawad, H. M., Brestic, M., Zhang, X. & Huang, L. (2021). Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicología y Seguridad Ambiental*, 222: 112-515. DOI:10.1016/j.ecoenv.2021.112510

Kochhar, S. L. & Kaur, G. S. (2020). Chapter 4. Mineral Nutrition and Absorption. En S. L. Kochhar & G. S. Kaur (Eds.), *Plant Physiology. Theory and Applications* (pp:100-134). Cambridge University Press.

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H. & Song, A. (2015a). Chapter 3. Silicon Biogeochemistry and Bioavailability in Soil. En Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong & A. Song. *Silicon in Agriculture From Theory to Practice* (pp:45-65). Springer Science+Business Media Dordrecht. DOI:10.1007/978-94-017-9978-2

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H. & Song, A. (2015b). Chapter 1. History and Introduction of Silicon Research. En Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong & A. Song. *Silicon in Agriculture From Theory to Practice*, (pp:1-14). Springer Science+Business Media Dordrecht. DOI:10.1007/978-94-017-9978-2

Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H. & Song, A. (2015c). Chapter 9. Silicon and Plant-Pathogen Interactions. En Y. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong & A. Song. *Silicon in Agriculture From Theory to Practice* (pp:181-193). Springer Science+Business Media Dordrecht. DOI:10.1007/978-94-017-9978-2

Loya, R. J. G., Beltrán, M. F. A., Zamora, S. S., Ruiz, E. F. H. & Navajas, J. J. (2022). Tierra de diatomeas: una alternativa sustentable para protección de maíz almacenado. *Journal of Agricultural Sciences Research*, 2(2): 1-5. DOI:10.22533/at.ed.973222201036

Ma, J. F. & Yamaji, N. (2015). A cooperated system of silicon transport in plants. Review. *Trends in Plant Science*, 20 (7): 435-442. DOI:10.1016/j.tplants.2015.04.007

Maldonado, Y. (2022). Geología web. Minerales y Piedras Preciosas: nombres, tipos, significado y fotos. https://geologiaweb.com/minerales/piedras-preciosas/#google_vignette

Marrero-Artabe, L., Torrent Molina, J., Velázquez Carrera, N., Socorro Fuentes, V., & Ramírez González, M. (2020). Eficacia de Tierra Diatomea para el control de *Sitophilus zeamais* Motschulsky en un silo metálico. *Revista de Protección Vegetal*, 35(1).

Méndez-Otero, A. C., & Castellanos González, L. (2019). Eficacia de la tierra de diatomeas

y la cal sobre ariónidos y agriolimácidos. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(3), 579-593.

Mitani-Ueno, N. & Feng, M. J. (2020). Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(1), 10-17. DOI:10.1080/00380768.2020.1845972

Osterrieth, M., Frayssinet, L., Benvenuto, L., Donna, R., Paolicchi, M. R., Frayssinet, C., Borrelli, N., Fernández, H. M. N. & Morel, E. (2019). Sílice amorfa y biogeoquímica del silicio en secuencias pedosedimentarias del sudeste bonaerense. V Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie (RAGSU), La Plata, pp 402- 405. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77848>

Pandey, R., Singh, C., Mishra, S., Iderawumi, A. M. & Vyas, D. (2024). Silicon uptake and transport mechanisms in plants: processes, applications and challenges in sustainable plant management, *Biología Futura*, 76(1):19-31. DOI:10.1007/s42977-024-00247-x

Peñaloza, L. M. B. (2021). Evaluación del comportamiento agronomico del cultivo de tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) con aplicación de dióxido de silicio (SiO₂). [Proyecto de investigación para obtener el grado, Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/38723f0d-c4bd-47b5-8ff9-e4973f7ed2c4/content>

Raturi, G., Sharma, Y., Rana, V., Thakral, V., Myaka, B., Salvi, P., Singh, M., Dhar, H. & Deshmukh, R. (2021). Exploration of silicate solubilizing bacteria for sustainable agricultura and silicon biogeochemical cycle. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166. 827 -838. DOI:10.1016/j.plaphy.2021.06.039

Raya, P. J. C. & Aguirre, M. C. L. (2012). El papel del Silicio en los organismos y ecosistemas. *Conciencia Tecnológica*, 43: 42-46. <https://www.redalyc.org/pdf/944/94424470007.pdf>

Raza, T. S., Abbas, M., Amna, Imran, S., Yahya, K. M., Rebi, A., Rafie-Rad, Z. & Eash, N.

(2023). Impact of silicon on plant nutrition and significance of silicon mobilizing bacteria in agronomic practices. *Silicon*, 15:3797-3818. DOI:10.1007/s12633-023-02302-z

Reven, J. A. (2003). Cycling silicon – the role of accumulation in plants. Commentary. *New Phytologist Forum*, 158:3 pp: 419-421. DOI:10.1046/j.1469-8137.2003. 00778.x

Rodrigues, F. A., Dallagnol, L. J., Silveira, D. H. S. & Datnoff, L. E. (2015). Chapter 4. Silicon Control of Foliar Diseases in Monocots and Dicots. En F. A. Rodrigues & L. E. Datnoff (Eds). *Silicon and Plant Diseases*. Springer International Publishing Switzerland. DOI:10.1007/978-3-319-22930-0

Sathe, A. P., Kumar, A., Mandlik, R., Raturi, G., Yadav, H., Kumar, N., Shivaraj, S. M., Jaswal, R., Kapoor, R., Kumar, G. S., Sharma, T. R. & Sonah, H. (2021). Role of silicon in elevating resistance against sheath blight and blast diseases in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 166:128-139. DOI:10.1016/j.plaphy.2021.05.045

Schaller, J., Puppe, D., Kaczorek, D., Ellerbrock, R. & Sommer, M. (2021). Silicon Cycling in Soils Revisited. *Plants*, 10,295. DOI:10.3390/plants10020295

Statista Research Department. (2024). Chemicals & Resources: Mining, Metals & Minerals: Silicon mining worldwide – statistics & facts. <https://www.statista.com/topics/1959/silicon/#topicOverview>

Strömberg, C. A. E., Di Stilio, V. S. & Song, Z. (2016). The functional role of silicon in plant biology. Functions of phytoliths in vascular plants: an evolutionary perspective. *Functional Ecology*. 30: (8), 1286-1297. DOI:10.1111/1365-2435.12692

Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A. & Zeiger, E. (Eds.). (2022). *Plant Physiology and Development*. Oxford University Press.

Tombeur, F., Turner, B. L., Laliberté, E., Lambers, H. & Cornelis, J-T. (2020). Silicon dynamics during 2 million years of soil development in a coastal dune Chronosequence under a Mediterranean climate. *Ecosystems*. DOI:10.1007/s10021-020-00493-9

Willey, N. (2016). Chapter 7: Essential and Beneficial Elements. En Willey, N. (Ed.), *Environmental Plant Physiology* (pp:153-174). Garland Science, Taylor & Francis Group, LLC.

CC BY-NC-ND

SESIÓN 2. BIOPROSPECCIÓN Y MODOS DE ACCIÓN

13.1. Efecto de la aplicación de hongos micorrízicos arbusculares sobre en la germinación de *Capsicum annuum* L. y *C. chinense* Jacq.

Yamilet Mora Soto^{1*}; Alfredo Reyes Tena¹; Nuria Gómez Dorantes¹; Raúl Cárdenas Navarro¹; Juan Carlos Álvarez Hernández²; Luis López Pérez¹

¹Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Km. 9.5 Carretera Morelia-Zinapécuaro, C.P. 58880, Tarímbaro, Michoacán, México.

²Intituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de Apatzingán, C.P. 60781. Antúnez, Parácuaro, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia: 1132958f@umich.mx

Las micorrizas incrementan la calidad y productividad de los cultivos, disminuyen el empleo de fertilizantes por el aporte de nutrientes y agua a la planta, brindan resistencia contra enfermedades y reducen la erosión del suelo. En este trabajo se estimó el porcentaje de colonización micorrízica en distintas variedades de chile, con la finalidad de utilizarse para pruebas posteriores. Se emplearon cuatro cultivares de *Capsicum annuum* (jalapeño, serrano, güero, caribe) y *C. chinense* (habanero), a los cuales se les inoculó un producto comercial de micorrizas a base de *Glomus intraradices* y *G. fasciculatum*. Las semillas se sembraron en charolas que contenían una mezcla de arena roja y blanca (1:1 p/p), en esta se adicionó 12 g de la micorriza comercial de modo que estuviera incorporada junto a las semillas. Las charolas se mantuvieron a capacidad de campo mediante riegos diarios con agua desionizada. Se determinó como variables respuesta el porcentaje de germinación y la colonización micorrízica. Los resultados mostraron a los 19 días después de la siembra, una germinación asincrónica, destacando el cultivar jalapeño una germinación del 58% y serrano con 50% comparado con habanero que presentó un 72% a diferencia del chile güero y caribe con 0%. A su vez, el porcentaje de colonización micorrízica para serrano fue del 78.3% a diferencia del habanero con un 71.6%. Asimismo, en la existencia de estructuras micorrízicas se registró en jalapeño y serrano la presencia de arbusculos, hifas y vesículas mientras que en el habanero se visualizaron hifas y vesículas. En conclusión, las micorrizas tienen efectos en la germinación de semillas de chile, por lo que es necesario tener en cuenta este factor además de la luz, humedad, etc., ya que la asociación simbiótica entre las especies con el inóculo micorrízico son determinantes en la germinación y se sugiere más investigaciones al respecto.



LANIES
LABORATORIO NACIONAL
DE INNOVACIÓN
ECOTECNOLÓGICA
PARA LA SUSTENTABILIDAD



PRIMER ENCUENTRO NACIONAL
SOBRE MICROORGANISMOS
BENÉFICOS PARA LA AGRICULTURA



iies

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD
UNAM



OTORGA LA PRESENTE CONSTANCIA A:

Yamilet Mora Soto, Alfredo Reyes Tena, Nuria Gómez Dorantes, Raúl Cárdenas Navarro, Juan Carlos Álvarez Hernández, Luis López Pérez

Por su participación con el trabajo

Efecto de la aplicación de hongos micorrízicos arbusculares sobre en la germinación de *Capsicum annuum* L. y *C. chinense* Jacq

Cartel

durante el Primer Encuentro Nacional sobre Microorganismos Benéficos para la Agricultura del 18 al 20 de septiembre del 2024, en Morelia, Michoacán.



JOHN LARSEN
COMITÉ ORGANIZADOR
LABORATORIO DE AGROECOLOGÍA, IIES

**ANTONIO GONZÁLEZ
RODRÍGUEZ**
COORDINADOR LANIES



13.2. Uso de hongos formadores de micorriza arbuscular y dióxido de silicio en el crecimiento y bioprotección de chile (*Capsicum annuum* L.), contra *Phytophthora capsici* L.

Yamilet Mora Soto¹, Alfredo Reyes Tena¹, Nuria Gómez Dorantes¹, Raúl Cárdenas Navarro¹, Juan Carlos Álvarez Hernández², Luis López Pérez¹.

¹Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Km. 9.5 Carretera Morelia-Zinapécuaro, C.P. 58880, Tarímbaro, Michoacán, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de Apatzingán, C.P. 60781. Antúnez, Parícut, Michoacán, México.

El sistema de producción del chile requiere grandes cantidades de fertilizantes y pesticidas para el control de enfermedades como *Phytophthora capsici*. En los últimos años se han desarrollado alternativas para contrarrestar los desbalances nutricionales y el control de enfermedades mediante el uso de hongos micorrizicos arbusculares (HMA) y elementos benéficos como el silicio. En este trabajo se evaluó el efecto en el crecimiento vegetal y bioprotección de plantas de chile contra *P. capsici* mediante el uso de HMA y dióxido de silicio. Se utilizaron semillas de chile jalapeño las cuales cuando tenían 40 días se trasplantaron a macetas de 1 litro que tenían una mezcla estéril de peat-most, agrolita y vermiculita (3:2:1 V/V). La inoculación con los HMA se realizó en dos momentos, uno a la siembra y otro al momento del trasplante. Se dejaron aclimatar por 26 días y posteriormente se les adicionó una solución de SiO₂ a tres diferentes concentraciones (0g L⁻¹, 50g L⁻¹ y 100g L⁻¹), la cual, semanalmente se aplicó 100 ml para cada planta, además se regaron con la solución nutritiva Hoagland. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con nueve tratamientos, repetidos 10 veces cada uno. A los 76 días después del trasplante se midieron variables agronómicas de crecimiento y la colonización micorrízica. Resultados preliminares muestran que plantas de chile inoculadas al momento del trasplante y con una dosis de 50g L⁻¹ de SiO₂, obtienen un mayor crecimiento. Falta obtener la respuesta de las diferentes concentraciones de SiO₂, en el biocontrol contra *P. capsici*.

Palabras clave: chile jalapeño, SiO₂ desarrollo, biocontrol, bioefectores.



13.3. Presencia de hongos endófitos septados oscuros, en raíces micorrizadas de *Capsicum* sp.: un reporte preliminar

Yamilet Mora-Soto^{1*}, Alfredo Reyes-Tena¹, Raúl Cárdenas-Navarro¹, Nuria Gómez-Dorantes¹, Juan Carlos Álvarez-Hernández² y Luis López-Pérez^{1*}.

¹ Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. ² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

*Autor para correspondencia. 1132958F@umich.mx; luis.lopez.perez@umich.mx

Los hongos endófitos septados oscuros (ESO), son microorganismos que casi siempre los encontramos colonizando las raíces de las plantas, pero poca importancia se les ha puesto y muy poco se sabe si es que tienen el potencial para mejorar el desarrollo vegetal y la tolerancia a diversos estreses. En estudios con hongos micorrízicos arbusculares colonizando las plantas, generalmente se encuentran estos endófitos, pero nunca se reportan o simplemente se descartan de las cuantificaciones. El presente estudio tuvo como objetivo, reportar y cuantificar, la presencia de hongos endófitos presentes en raíces de chile (*Capsicum* sp.), establecidas en condiciones controladas y micorrizadas con un consorcio comercial de hongos micorrízicos compuesto por *Rhizophagus intraradices* y *R. fasciculatum*. Se pusieron a germinar semillas de chile en charolas de aluminio, donde se utilizó como sustrato una mezcla estéril de arena roja (tezontle) y blanca, donde se aplicó 12 g del inóculo de HMA. A los 40 días después de la siembra se colectaron raíces, las cuales se clarearon y tiñeron (azul tripano) y posteriormente se cuantificó el porcentaje de colonización de HMA y ESO. La observación de las raíces, evidenció estructuras típicas de HMA (esporas, hifas, arbusculos), y también estructuras características de los ESO. Los valores de colonización variaron de 58.12 a 78.71% para los HMA y de 7.95 a 14.90% para los ESO. Este hallazgo revela que los ESO, pueden provenir del inóculo comercial o inclusive en la semilla y que tiene gran capacidad de colonización, lo cual podría afectar la colonización por los HMA. Se requiere una mayor investigación para poder identificarlos, además de su posible efecto en la interacción con los HMA y su función en interacción con la planta.

Palabras clave: chile, colonización, interacciones bióticas, crecimiento

Área temática. Innovación en la producción, formulación y aplicación de microorganismos

Formato de Presentación. Cartel

13.4. Influencia de la simbiosis micorrízica arbuscular y la aplicación de silicio en el crecimiento de tres cultivares de chile en condiciones hidropónicas

Yamilet Mora-Soto^{1*}, Alfredo Reyes-Tena¹, Raúl Cárdenas-Navarro¹, Nuria Gómez-Dorantes¹, Juan Carlos Álvarez-Hernández², Luis López-Pérez^{1*}

¹Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Km. 9.5 Carretera Morelia-Zinapécuaro. Tarímbaro. Michoacán. CP. 58880, México. ²Intituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de Apatzingán. Antúnez, Parácuaro, Michoacán, México. C.P. 60781.

*Autor para correspondencia: 1132958f@umich.mx; luis.lopez.perez@umich.mx

La agricultura sostenible busca estrategias que promuevan el crecimiento vegetal y fortalezcan a los cultivos frente a factores estresantes. Una alternativa prometedora es la interacción entre hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y la fertilización con silicio, cuyos efectos positivos en el desarrollo y defensa de las plantas han sido reportados en diversos estudios. El objetivo de este estudio fue evaluar el crecimiento de tres cultivares de chile (*Capsicum* sp.): jalapeño, serrano y habanero, micorrizados desde la siembra con un consorcio comercial (*Rhizophagus intraradices* y *R. fasciculatum*). A los 40 días después de la siembra se cuantificó el porcentaje de colonización micorrízica y se trasplantaron a macetas de plástico con una mezcla de peat-most, agrolita y vermiculita. Luego de 27 días después del trasplante (ddt), se aplicaron tres tratamientos: solución Hoagland (control), un producto comercial con 35% de SiO₂ y tierra de diatomeas con 90.77% de SiO₂. Se realizaron mediciones semanales de altura, diámetro y número de hojas hasta los 79 ddt, donde se realizó un muestro destructivo para evaluar variables de crecimiento. Se encontró que los cultivares mostraron diferencias significativas en el crecimiento, siendo que el chile serrano el que presentó mayor altura, diámetro y biomasa total, el cultivar jalapeño destacó por un mayor incremento en el número de hojas, longitud de la raíz y área foliar mientras que el chile habanero tuvo el menor desarrollo vegetal en todas las variables. Las plantas regadas con la solución Hoagland mostraron el mayor crecimiento vegetal; respecto a las fuentes de silicio, la tierra de diatomeas mostró poco efecto comparado con el producto comercial, el cual afectó drásticamente el crecimiento del cultivar serrano. Se concluye, que la aplicación de silicio en cultivares de chile micorrizados, debe considerarse la concentración, la fuente de origen y frecuencia de uso para evitar efectos adversos en los cultivos.

Palabras clave: micorrización, crecimiento vegetal, sinergismo, silicio

Área temática. Innovación en la producción, formulación y aplicación de microorganismos

Tipo de presentación: Cartel

13.5. Reporte de Similitud generado por el sistema Turnitin iThenticate



Página 1 de 167 - Portada

Identificador de la entrega tm:oid::3117:506283562

Yamilet Mora Soto

Uso de hongos formadores de micorriza arbuscular y dióxido de silicio en el crecimiento y bioprotección de chile (*Capsicum* ...



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

tm:oid::3117:506283562

Fecha de entrega

1 oct 2025, 8:54 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

1 oct 2025, 9:22 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Uso de hongos formadores de micorriza arbuscular y dióxido de silicio en el crecimiento y biopro....pdf

Tamaño del archivo

2.8 MB

141 páginas

42.238 palabras

222.104 caracteres



Página 1 de 167 - Portada

Identificador de la entrega tm:oid::3117:506283562

32% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 31%  Fuentes de Internet
- 22%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

13.6. Reporte de Similitud generado por el sistema Turnitin iThenticate con filtro



Página 1 de 158 - Portada

Identificador de la entrega tm:oid::3117:506283562

Yamilet Mora Soto

Uso de hongos formadores de micorriza arbuscular y dióxido de silicio en el crecimiento y bioprotección de chile (*Capsicum* ...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

tm:oid::3117:506283562

Fecha de entrega

1 oct 2025, 8:54 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

1 oct 2025, 9:25 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Uso de hongos formadores de micorriza arbuscular y dióxido de silicio en el crecimiento y biopro....pdf

Tamaño del archivo

2.8 MB

141 páginas

42.238 palabras

222.104 caracteres



Página 1 de 158 - Portada

Identificador de la entrega tm:oid::3117:506283562



Página 2 de 158 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: tm:oid::3117:506283562

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 17%  Fuentes de Internet
- 13%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitan distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Página 2 de 158 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: tm:oid::3117:506283562

13.7. Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Programa de Maestría en Producción Agropecuaria	
Título del trabajo	Uso de hongos formadores de micorriza arbuscular y dióxido de silicio en el crecimiento y bioprotección de chile (<i>Capsicum annuum</i> L.), contra <i>Phytophthora capsici</i> L.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Yamilet Mora Soto	1132958f@umich.mx
Director	Dr. Luis López Pérez	luis.lopez.perez@umich.mx
Codirector	Dr. Alfredo Reyes Tena	alfredo.reyes@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Juan Pablo Flores Padilla	mae.prod.agropecuaria.agricola@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	sí	Se empleó Copilot (Microsoft, 2025) como asistente para mejorar la claridad y coherencia del texto, sin embargo, las decisiones finales tanto en contenido, estructura y orden de la tesis fueron con base al criterio de la autora y en la consideración de las correcciones del director, codirector y sinodales.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Para facilitar la lectura y comprensión de artículos científicos redactados en inglés u otro idioma, se utilizó Google Traductor como apoyo lingüístico, sin embargo, las interpretaciones y el análisis derivado de la traducción fueron contrastados mediante el conocimiento propio.
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Sí	Se empleó Copilot (Microsoft, 2025) para asesorar el estilo, el tono del texto académico y evitar el uso repetitivo de conectores, así como también evitar en lo posible errores tipográficos, sin embargo, se consideró el criterio de la autora y las revisiones de los directores y sinodales.
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, 01 de octubre de 2025